



**Tiago André
da Fonseca Meneses**

**Estudo do comportamento térmico de
construções em alvenaria de adobe**



**Tiago André
da Fonseca Meneses**

**Estudo do comportamento térmico de
construções em alvenaria de adobe**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Auxiliar, e do Doutor Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus Pais, Carlos Meneses e Helena Meneses
e Namorada, Arq. Sandra Almeida.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim

professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José António Raimundo Mendes da Silva

professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa

professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Uma tese de mestrado é o reflexo de um trabalho colectivo, embora a sua elaboração tenha um cariz individual.

É com muita satisfação que expresso e registo o meu profundo reconhecimento e gratidão a todos aqueles que tornaram a realização deste trabalho possível.

Aos meus orientadores científicos Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente e Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa, o precioso apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho.

Ao Eng. António Figueiredo que sempre se disponibilizou para desenvolver, acompanhar e incentivar em todas as etapas deste trabalho.

À empresa Corticeira Amorim pela disponibilização e entrega da cortiça.

Ao Instituto da Construção, FEUP pela ajuda para a construção das células de teste.

Ao Departamento de Ambiente e à Protecção Civil do Município de Aveiro pelos dados climáticos fornecidos pelas estações meteorológicas.

A todos os meus amigos, especialmente ao Fábio Meneses Oliveira, Pedro Rodrigues e Gil Sousa por todos os momentos passados juntos, pela ajuda na construção das células de teste mas sobretudo pela amizade incondicional.

Aos meus pais e irmão, pelo estímulo e apoio ao longo deste anos, pela paciência com que sempre me ouviram e sensatez com que sempre me ajudaram.

Finalmente, um agradecimento muito especial à minha namorada, pelo carinho, compreensão, paciência e incondicional apoio e amor.

A todos os meus sinceros agradecimentos

palavras-chave

Construção em terra, adobe, comportamento térmico.

resumo

Em Portugal existe um vasto património construído em alvenaria de adobe que perdurou ao longo dos tempos, localizado sobretudo na zona litoral centro, particularmente na região de Aveiro. Devido ao acentuado estado de degradação que grande parte deste património apresenta, cresceu a necessidade da sua reabilitação.

Esta dissertação de mestrado aborda o tema do comportamento térmico das construções em alvenaria de adobe, face à actual regulamentação térmica que apresenta novos desafios no que respeita à utilização da terra crua em novas construções, bem como na determinação das suas propriedades nos processos de reabilitação térmica e energética de edifícios existentes.

São apresentados os resultados de uma campanha experimental que consistiu na construção de três células de teste em alvenaria de adobe com diferentes características à escala $\frac{1}{4}$ do real.

Dos resultados obtidos para as três células de teste foi avaliada e quantificada a inércia térmica e a condutibilidade térmica da terra das respectivas paredes de adobe.

Urge adaptar as nossas construções em terra a condições de habitabilidade e de conforto térmico aos níveis de exigência pretendidos nos dias correntes, melhorando a performance e a atractividade das construções em terra.

keywords

Earth construction, adobe, thermal performance.

abstract

In Portugal, there is a vast built heritage of adobe masonry which has prevailed through the ages, located mainly near the center coastline, particularly in the region of Aveiro. Due to their advance state of degradation of these earth constructions, the need for their rehabilitation has grown.

This thesis deals with the topic of the thermal behavior of adobe masonry buildings, given the actual thermal code that presents new challenges regarding the use of earth in new construction, as well as in determining their properties in processes of energy and thermal rehabilitation of existing buildings.

The results of an experimental campaign carried out, which consisted of the construction of three test cells in adobe masonry with different characteristics at a quarter of the real scale are presented.

From the obtained results for the three test cells, thermal inertia was evaluated and quantified and the thermal conductivity of the earth of the adobe masonry walls was determined.

It is urgent to adapt the existent adobe building stock to actual and desired housing conditions and thermal comfort levels, improving the overall performance and attractiveness of earth constructions.

ÍNDICE GERAL

Índice de Figuras	V
Índice de Tabelas	IX
Lista de Símbolos	XI
 Capítulo 1 Introdução	 3
1.1 Enquadramento	3
1.2 Motivação	3
1.3 Objectivos	4
1.4 Estratégia	4
1.5 Estrutura da dissertação	5
 Capítulo 2 Construções em alvenaria de adobe	 9
2.1. Construção em terra no Mundo -enquadramento histórico	9
2.2. Construção em terra em Portugal	10
2.2.1. Técnicas tradicionais de construção em terra	10
2.2.2. Condicionismos que marcaram a distribuição geográfica das principais técnicas de construção em terra em Portugal	11
2.2.3. Regulamentação portuguesa sobre construções em terra	12
2.3. O adobe como técnica construtiva	13
2.4. Construção em alvenaria de adobe em Aveiro	14
2.5. Potencial da construção em terra	15
2.6. A utilização da cortiça em paredes de adobe	16
 Capítulo 3 Comportamento e desempenho térmico das construções em terra	 21
3.1. Conforto Térmico	21
3.2. Comportamento térmico das construções	21

3.2.1.	Formas de propagação de calor	22
3.2.2.	Transmissões de calor através dos elementos de construção	23
3.3.	Inércia térmica nas construções em terra.....	24
3.4.	A terra como PCM natural	26
3.5.	Ensaio térmico em construções de adobe	27
3.6.	Consumos energéticos e emissões de carbono na construção.....	29
3.7.	Qualidade do ar interior	30
3.8.	Regulamentação térmica Decreto-Lei 80/2006 e a adaptabilidade das construções em terra.....	31
3.9.	Incorporação de cortiça como isolamento térmico	33
Capítulo 4 Construção das células de teste em alvenaria de adobe.....		37
4.1.	Células de teste em alvenaria de adobe.....	37
4.1.1.	Base e cobertura das células de teste	37
4.2.	Caracterização granulométrica.....	40
4.3.	Célula de teste número 1.....	41
4.3.1.	Processo de produção de adobes	41
4.3.2.	Processo de construção da célula de teste.....	42
4.4.	Célula de teste número 2.....	43
4.4.1.	Processo de produção de adobes	43
4.4.2.	Processo de construção da célula de teste.....	44
4.5.	Célula de teste número 3.....	44
4.5.1.	Processo escolha da composição ideal para a adição de cortiça no adobe.....	45
4.5.1.1.	Caracterização mecânica (ensaio de flexão e de compressão)	45
4.5.1.2.	Determinação do teor em água	47
4.5.1.3.	Aspectos observados nas amostras com adição de cortiça.....	48
4.5.1.4.	Seleção da composição ideal para a adição de cortiça no adobe.....	49
4.5.2.	Processo de produção de adobes	50
4.5.3.	Processo de construção da célula de teste.....	50

4.6.	Reboco das células de teste	50
4.7.	Transporte das células de teste para o local a realizar os ensaios.....	51
Capítulo 5 Instrumentação das células de teste e resultados obtidos.....		55
5.1.	Sistema de monitorização e aquisição de dados	55
5.2.	Processo de instrumentação das células de teste	56
5.3.	Resultados obtidos.....	57
5.3.1.	Condicionantes do ensaio	57
5.3.2.	Análise climatérica do mês de Maio	60
5.3.2.1.	Temperatura	60
5.3.2.2.	Precipitação	62
5.3.2.3.	Radiação.....	62
5.3.3.	Análise e discussão dos resultados obtidos.....	63
5.3.3.1.	Dia 1 de Maio de 2010.....	63
5.3.3.2.	Dia 5 de Maio de 2010.....	66
5.3.3.3.	Dia 10 de Maio de 2010.....	69
5.3.3.4.	Dia 13 de Maio de 2010.....	71
5.3.3.5.	Dia 21 de Maio de 2010.....	73
5.3.3.5.	Dia 22 de Maio de 2010.....	76
5.3.4.	Determinação da condutibilidade térmica das diferentes células de teste.....	78
5.3.5.	Comentário final	80
Capítulo 6 Conclusões e desenvolvimentos futuros		83
6.1.	Conclusões principais	83
6.1.1.	Construções em adobe	83
6.1.2.	A térmica de edifícios	83
6.1.3.	Instrumentação e resultados	84
6.1.3.1.	Inércia térmica	84

6.1.3.2.	Condutibilidade térmica.....	84
6.1.4.	Perspectivas futuras.....	85
Referencias Bibliográficas		89
ANEXOS		
	Anexo A – Restantes dias de registo.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 Introdução	3
Figura 1: Sintetização da estratégia da dissertação e relacionamento com a organização em capítulos	4
Capítulo 2 Construções em alvenaria de adobe	9
Figura 2: Mapa-mundo - Zonas com elevada densidade de construção em terra [10]	9
Figura 3: Distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra. Adaptado de [13]	11
Figura 4: Precipitação total anual e Temperatura média anual, entre 1960 e 1991 em Portugal Continental [14]	12
Figura 5: Construções com cortiça em Portugal [24]	16
Figura 6: Simulações dos diversos tipos de paredes em alvenarias de cortiça [24]	17
Capítulo 3 Comportamento e desempenho térmico das construções em terra	21
Figura 7: Gráfico de uma pequena amplitude térmica de uma habitação [34]	25
Figura 8: Gráfico de uma grande amplitude térmica de uma habitação [34]	25
Figura 9: Três células de teste construídas [36]	27
Figura 10: Gráfico das temperaturas registadas de 6 a 11 de Agosto de 2004 [36]	28
Figura 11: Gráfico de humidades registadas de 6 a 11 de Agosto de 2004 [36]	28
Figura 12: Carbono incorporado em materiais para alvenarias [39]	29
Figura 13: Água absorvida por diferentes materiais quando a humidade relativa sobe de 50 para 80% [42]	31
Capítulo 4 Construção das células de teste em alvenaria de adobe	37
Figura 14: Casa modelo	37
Figura 15: Materiais da base e cobertura	38
Figura 16: Cobertura das células de teste	38
Figura 17: Colocação dos puxadores	38
Figura 18: Cobertura com os puxadores	38
Figura 19: Parte inferior da cobertura	39
Figura 20: Base das células de teste	39
Figura 21: Cortes nas bases	39
Figura 22: Curva granulométrica da terra	40

Figura 23: Curva granulométrica da areia.....	40
Figura 24: Adobeira usada.....	41
Figura 25: Dimensões dos adobes à escala ¼ do real.....	41
Figura 26: Enchimento do molde de adobes.....	41
Figura 27: Secagem dos adobes e acondicionamento na paleta para transporte.....	42
Figura 28: Fase inicial da construção da célula de teste número 1.....	42
Figura 29: Fase final da construção da célula de teste número 1.....	43
Figura 30: Processo de corte dos adobes existentes para a construção da segunda célula de teste.....	43
Figura 31: Processo de corte dos adobes existentes para a construção da segunda célula de teste.....	44
Figura 32: Diferentes fases da construção da célula de teste número 2.....	44
Figura 33: Componentes das amostras.....	45
Figura 34: Ensaio de Flexão.....	46
Figura 35: Ensaio de compressão.....	46
Figura 36: Resultados do ensaio de flexão aos 14 dias.....	46
Figura 37: Resultados do ensaio de compressão aos 14 dias.....	47
Figura 38: Resultados do ensaio do teor em água.....	48
Figura 39: Pesos das amostras.....	48
Figura 40: Relação otimizada entre a resistência mecânica e o teor em água.....	49
Figura 41: Diferentes fases da construção da célula de teste número 3.....	50
Figura 42: Reboco das três células de teste.....	50
Figura 43: Reboco das três células de teste.....	51
Figura 44: Transporte das três células de teste para o exterior.....	51
 Capítulo 5 Instrumentação das células de teste e resultados obtidos	55
Figura 45: Sistema de monitorização e aquisição de dados.....	55
Figura 46: Posicionamento dos sensores PT100 na célula de teste.....	56
Figura 47: Instrumentação das células de teste.....	57
Figura 48: Fecho e isolamento das células de teste.....	57
Figura 49: Posicionamento do sol ao longo do dia em relação às células de teste.....	58
Figura 50: Sombra do Departamento de Engenharia Civil sobre as células de teste.....	59
Figura 51: Sombra do Departamento de Engenharia Mecânica sobre as células de teste.....	59
Figura 52: Distribuição espacial das temperaturas mínima, média e máxima em Maio de 2010 [14].....	60
Figura 53: Desvios em relação à média de 1971-2000 das temperaturas mínima, média e máxima em Maio de 2010 [14].....	61
Figura 54: Temperaturas máximas e mínimas registadas no mês de Maio em Aveiro [50; 51].....	61

Figura 55: Precipitação total em Maio e respectiva percentagem em relação à média 1971-2000 [14].....	62
Figura 56: Insolação, Maio de 2010 [14].	63
Figura 57: Insolação em Aveiro, Maio de 2010 [50; 51].	63
Figura 58: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 1 de Maio de 2010.....	64
Figura 59: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 1 de Maio de 2010.....	64
Figura 60: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 1 de Maio de 2010.....	64
Figura 61: Temperaturas das três células de teste no dia 1 de Maio de 2010.....	65
Figura 62: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 5 de Maio de 2010.....	66
Figura 63: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 5 de Maio de 2010.....	67
Figura 64: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 5 de Maio de 2010.....	67
Figura 65: Temperaturas das três células de teste no dia 5 de Maio de 2010.....	67
Figura 66: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 10 de Maio de 2010.....	69
Figura 67: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 10 de Maio de 2010.....	69
Figura 68: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 10 de Maio de 2010.....	70
Figura 69: Temperaturas das três células de teste no dia 10 de Maio de 2010.	70
Figura 70: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 13 de Maio de 2010.....	71
Figura 71: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 13 de Maio de 2010.....	72
Figura 72: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 13 de Maio de 2010.....	72
Figura 73: Temperaturas das três células de teste no dia 13 de Maio de 2010.....	72
Figura 74: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 21 de Maio de 2010.....	74
Figura 75: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 21 de Maio de 2010.....	74
Figura 76: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 21 de Maio de 2010.....	74
Figura 77: Temperaturas das três células de teste no dia 21 de Maio de 2010.....	75
Figura 78: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 22 de Maio de 2010.....	76
Figura 79: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 22 de Maio de 2010.....	76
Figura 80: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 22 de Maio de 2010.....	77
Figura 81: Temperaturas das três células de teste no dia 22 de Maio de 2010.....	77
Figura 82: Relação entre o peso específico da terra e a condutibilidade térmica λ [53].....	80

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 3 Comportamento e desempenho térmico das construções em terra	21
Tabela 1: Coeficientes de transmissão térmica de paredes exteriores em adobe, U [W/(m ² .°C)] [32].	24
Tabela 2: Coeficientes de transmissão térmica de paredes interiores em adobe, U [W/(m ² .°C)] [32].	24
Tabela 3: Consumo de energia para a produção de diversos materiais de construção [34].	30
Tabela 4: Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos (U (W/m ² .°C)) [3].	32
Tabela 5: Zona climática do conselho de Aveiro [3].	32
Capítulo 4 Construção das células de teste em alvenaria de adobe	37
Tabela 6: Amostras das várias composições de adição de cortiça no adobe.	45
Capítulo 5 Instrumentação das células de teste e resultados obtidos	55
Tabela 7: Dados meteorológicos do dia 1 de Maio para Aveiro [50; 51].	65
Tabela 8: Resultados do ensaio do dia 1 de Maio.	65
Tabela 9: Dados meteorológicos do dia 5 de Maio para Aveiro [50; 51].	68
Tabela 10: Resultados do ensaio do dia 5 de Maio.	68
Tabela 11: Dados meteorológicos do dia 10 de Maio para Aveiro [50; 51].	70
Tabela 12: Resultados do ensaio do dia 10 de Maio.	71
Tabela 13: Dados meteorológicos do dia 13 de Maio [50; 51].	73
Tabela 14: Resultados do ensaio do dia 13 de Maio.	73
Tabela 15: Dados meteorológicos do dia 21 de Maio [50; 51].	75
Tabela 16: Resultados do ensaio do dia 21 de Maio.	75
Tabela 17: Dados meteorológicos do dia 22 de Maio [50; 51].	78
Tabela 18: Resultados do ensaio do dia 22 de Maio.	78
Tabela 19: Resultados para as diferentes células de teste da condutibilidade térmica λ e do coeficiente de transmissão térmica U .	79
Tabela 20: Resultados para as diferentes células de teste do coeficiente de transmissão térmica U e do coeficiente de condutibilidade térmica λ .	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_x	Fluxo de calor (Q_x)
A	Área do elemento (m^2)
λ	Coeficiente de condutibilidade térmica do material ($W/m \cdot ^\circ C$)
U	Coeficiente transmissão térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
R_{si}	Resistência térmica superficial interior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
R_j	Resistência térmica do elemento ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
θ_{int}	Temperatura interior ($^\circ C$)
θ_{ext}	Temperatura exterior ($^\circ C$)
θ_{si}	Temperatura superfície interior ($^\circ C$)
θ_{parede}	Temperatura no interior da parede ($^\circ C$)
e	Espessura do elemento (m)
m_{seco}	Massa do provete seco (gr)
$m_{saturado}$	Massa do provete saturado (gr)

CAPÍTULO 1

Introdução

CAPÍTULO 1 – Introdução

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Motivação
- 1.3 Objectivos
- 1.4 Estratégia
- 1.5 Estrutura da dissertação

1. Introdução

Este capítulo apresenta a introdução à dissertação, onde se define o tema desenvolvido enquadrando-o no contexto geral da engenharia civil. Apresenta-se ainda os objectivos genéricos, as estratégias adoptadas e a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

A história do início da construção em terra é quase tão antiga quanto a história do Homem, mas a data precisa do uso da terra na construção não é consensual [1].

Desde que o homem sentiu a necessidade de criar um abrigo para sua protecção, utilizou desde sempre os elementos que a natureza disponibilizou para os construir, pedras, árvores e particularmente terra.

Ao longo dos séculos a terra tem sido um dos materiais mais usados na construção; com o aparecimento do cimento, subsequente o betão armado, bem como o aparecimento do tijolo furado industrializado, os materiais tradicionais caíram no esquecimento vindo gradualmente a desaparecer acabando por serem postos de parte nas actuais construções. Contudo, a resistência deste material, bem como a qualidade das suas características é quase eterna, uma vez que muitos edifícios subsistiram durante séculos e até milénios [2].

Por outro lado, as preocupações com a preservação do planeta, grande parte devido ao impacto ambiental provocado pelo sector da construção, uma vez que este é responsável por elevados consumos energéticos e por altas emissões de dióxido de carbono [4], levam a uma busca de construções ecológicas e mais sustentáveis, o que começa a dar uma maior visibilidade aos materiais tradicionais, tais como a terra.

1.2 Motivação

A principal motivação advém de um grande trabalho que o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver na temática da construção em terra, com o intuito de contribuir com conhecimento para uma possível elaboração de um documento normativo de regulamentação sobre construção em terra.

1.3 Objectivos

O adobe na sua aplicação tradicional, pelos processos de produção associados possui características termofísicas muito variáveis. A actual regulamentação térmica apresenta novos desafios no que respeita à utilização da terra crua em novas construções, bem como na determinação das suas propriedades nos processos de reabilitação térmica e energética de edifícios existentes. Para as intervenções sobre edifícios construídos com estas técnicas é necessário dotar os técnicos de conhecimentos que lhe permitam responder às exigências da nova regulamentação. Com o presente trabalho pretende-se demonstrar as possibilidades de exploração da inércia térmica dos elementos em terra crua em paredes, associada ao solar passivo no inverno e a outras estratégias bioclimáticas no verão, considerando os ciclos diários e estacionais e salvaguardando os usos intermitentes. O principal objectivo prende-se em avaliar e quantificar a inércia térmica de paredes de adobe, comparando-a com os requisitos regulamentares mínimos.

Com o aumento da necessidade da eficiência energética dos edifícios, o nível de conhecimento dos parâmetros que condicionam a sua performance também precisa de aumentar.

O coeficiente global de perdas de calor e a capacidade calorífica são dois parâmetros fundamentais para o conhecimento da performance térmica da envolvente dos edifícios.

1.4 Estratégia

Para a execução deste trabalho, procedeu-se à realização de uma campanha experimental que consistiu na construção de três células de teste em alvenaria de adobe com diferentes composições à escala 1/4 do real, todas com as mesmas dimensões. A base e a cobertura são fronteiras adiabáticas para garantir que as trocas de energia se realizariam pelas paredes de adobe.

Após devidamente monitorizadas foram expostas às mesmas condições climáticas.

Numa fase final do trabalho foi avaliada e quantificada a inércia térmica de paredes de adobe, e posteriormente comparada com os requisitos regulamentares mínimos.

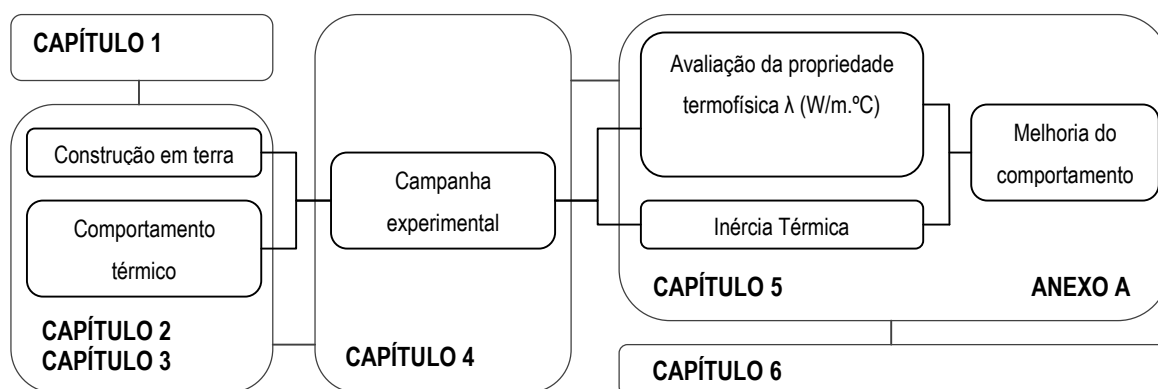


Figura 1: Sintetização da estratégia da dissertação e relacionamento com a organização em capítulos

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 6 capítulos e um anexo, dos quais o Capítulo 1 é a presente introdução à dissertação, na qual se define o tema desenvolvido enquadrado no contexto geral da engenharia civil, bem como os objectivos genéricos, estratégias adoptadas e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2, construções em alvenaria de adobe, apresenta o enquadramento teórico das construções em terra no mundo, com particular referência a Portugal. Retrata também o potencial deste tipo de construção e a necessidade do surgimento de regulamentação nacional de construção em terra, referenciando também registos antigos referentes à utilização da cortiça na construção em terra

No Capítulo 3, comportamento e características térmicas das construções em terra, faz-se uma abordagem ao conceito de conforto térmico e do comportamento térmico das construções, realçando-se ainda as propriedades térmicas da terra como material de construção bem como a qualidade do ar interior que este tipo de construção proporciona. É apresentada a terra como PCM (Phase Change Material) e os consumos energéticos e emissões de carbono na construção.

Neste capítulo são ainda contemplados, alguns estudos já efectuados, de ensaios térmicos em construções de adobe, bem como a adaptabilidade das construções em terra à regulamentação térmica em vigor, decreto-lei 80/2006 [3], fazendo um destaque à incorporação de cortiça como isolante térmico.

No Capítulo 4, é apresentada a campanha de ensaios experimentais desenvolvida para a realização deste trabalho, fazendo a descrição pormenorizada de todo o processo efectuado até à construção das três células de teste e transporte para o local a realizar o ensaio.

No Capítulo 5 é apresentado o sistema de monitorização e aquisição de dados, referenciando a metodologia seguida para o posicionamento dos sensores nas células de teste. Apresentam-se os resultados e a análise dos dados tratados da monitorização das três células de teste referentes ao mês de Maio.

Finalmente, no Capítulo 6 resumem-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, capítulo a capítulo, fornecendo ainda algumas perspectivas possíveis de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Construções em alvenaria de adobe

CAPÍTULO 2 – Construções em alvenaria de adobe

- 2.1. Construção em terra no Mundo - enquadramento histórico
- 2.2. Construção em terra em Portugal
 - 2.2.1. Técnicas tradicionais de construção em terra
 - 2.2.2. Condicionaisismos que marcaram a distribuição geográfica das principais técnicas de construção em terra em Portugal
 - 2.2.3. Regulamentação portuguesa sobre construções em terra
- 2.3. O adobe como técnica construtiva
- 2.4. Construção em alvenaria de adobe em Aveiro
- 2.5. Potencial da construção em terra
- 2.6. A utilização da cortiça em paredes de adobe

2. Construções em alvenaria de adobe

Este capítulo apresenta o enquadramento teórico das construções em terra, baseado em estudos desenvolvidos anteriormente por outros autores na temática da construção em terra. Com o intuito de se adquirir uma maior sensibilidade para os problemas inerentes a construção em alvenaria de adobe.

2.1. Construção em terra no Mundo -enquadramento histórico

Actualmente, mais de um terço da população do mundo vive em casas construídas de terra [5]. Como ilustra a figura 2, podemos encontrar construções em terra um pouco por todo o mundo, inúmeras delas edificadas há milhares de anos, conseguindo alcançar a actualidade [2]. Dos exemplos mais conhecidos destacam-se as habitações no actual Turquemenistão à base de blocos de terra, datadas de há mais de 9000 anos [6], as construções na Mesopotâmia que remontam há época de 5000 a 4000 A.C. [7], o Templo de Ramsés II em Gourná, no Egipto construído há 3200 anos, a Grande Muralha da China há 3000 anos, a pirâmide de Uxmal no México construída entre os séc. VI e X, as construções em adobe na América central do povoado de Taos, no estado do novo México, a cidade de Shibam do Iémen, ainda habitada com edifícios de 5 a 11 andares, onde existe um mirante que tem de altura 38 metros, entre muitas outras construções por todo o mundo [8].

Povos como os fenícios, cartagineses, muçulmanos ou romanos também usaram a terra como material construtivo, sendo a maior influência por parte dos muçulmanos e dos romanos que mais divulgaram este tipo de construção [9].

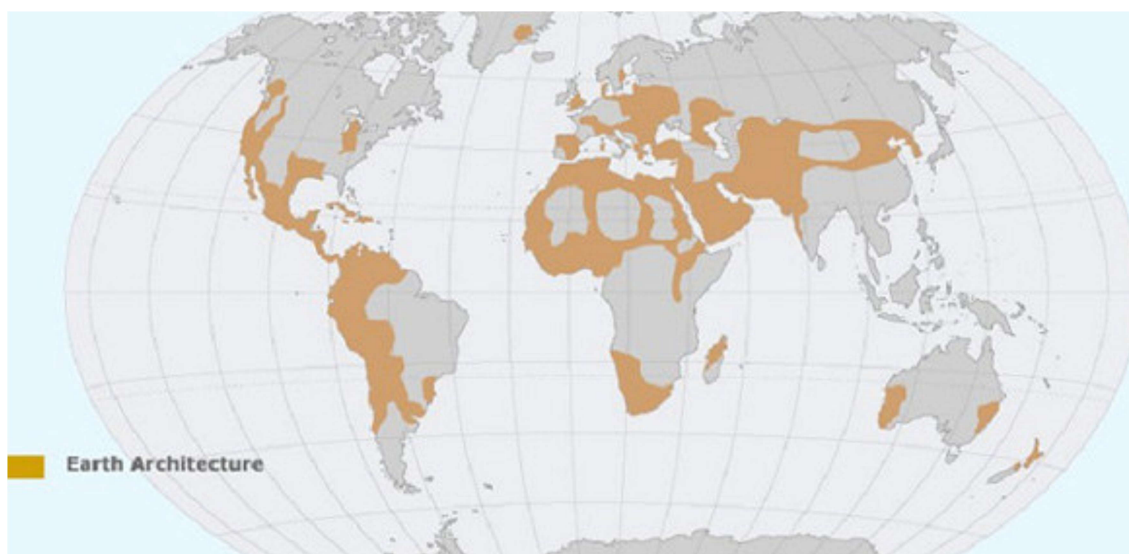


Figura 2: Mapa-mundo - Zonas com elevada densidade de construção em terra [10].

2.2. Construção em terra em Portugal

Em Portugal, a construção com materiais e técnicas tradicionais á base de terra é datada de há várias centenas de anos.

Foi nos finais do séc. XIX que se iniciou o uso massivo deste tipo de construções atingindo o seu auge na primeira metade do séc. XX. Na segunda metade do mesmo século verificou-se um declínio acentuado até ao seu desaparecimento como técnica construtiva. Actualmente por todo o país ainda são vários os exemplos de edifícios antigos neste tipo de alvenaria que enobrecem o património histórico Português e imortalizam várias técnicas tradicionais ancestrais de construção em terra [11; 12].

2.2.1. Técnicas tradicionais de construção em terra

As principais técnicas tradicionais de construção em terra são a taipa, o adobe e o tabique. A taipa é uma técnica que se baseia na execução de paredes auto-portantes “in situ”. Este tipo de construção em Portugal, é facilmente encontrada na zona abaixo do Tejo estendendo-se até ao Algarve. O adobe é uma técnica tradicional que consiste na execução de paredes com blocos (tijolos) de terra enformados e secos ao Sol. A presença deste tipo de construção em Portugal localiza-se sobretudo na zona litoral centro, distritos como Setúbal, Santarém, Leiria, Coimbra e Aveiro. O tabique é uma técnica tradicional usada na concepção de paredes que se baseia num engradado de madeira preenchido por terra. Estas edificações podem ser encontradas nas zonas das Beiras, Minho e Trás-os-Montes [1].

A figura 3 ilustra a distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra no território de Portugal Continental. Estes mapas, mesmo em actualização, mostram claramente como as diferentes técnicas tradicionais de construção em terra se dividem no território Português. Facilmente se constata que grande parte da construção em taipa se localiza no Sul do país, que a construção em adobe se localiza sobretudo no centro e que a construção em tabique apenas se encontra em algumas áreas do Interior Norte [13].

Mais recentemente em Portugal uma outra técnica construtiva começou a ser utilizada, a do Bloco de Terra Compactado ou BTC. O Bloco de Terra Compactado ou BTC é um material que pode ser usado como material estrutural ou de enchimento, trata-se de um bloco de terra crua prensado, que apresenta uma melhor resistência mecânica uma vez que o processo de prensagem aumenta a eficiência de ligação entre as partículas diminuindo a porosidade.

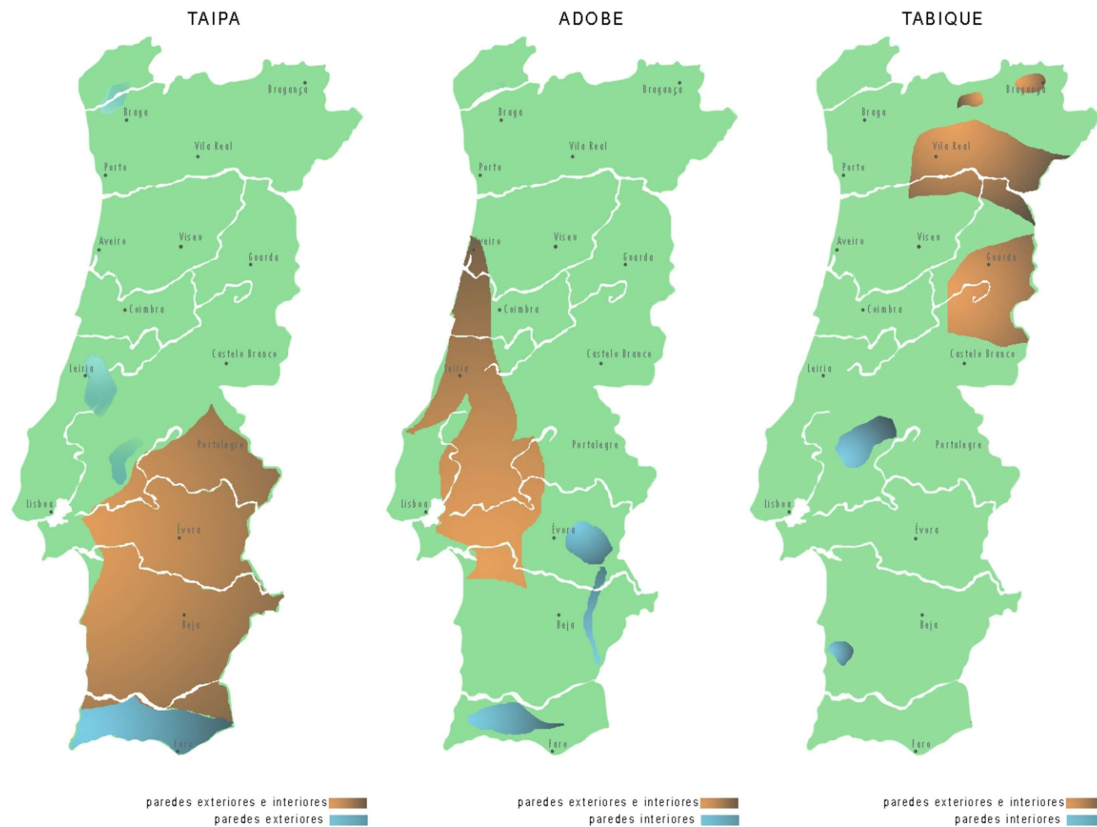


Figura 3: Distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra. Adaptado de [13].

2.2.2. Condicionaismos que marcaram a distribuição geográfica das principais técnicas de construção em terra em Portugal

A grande diversidade das técnicas construtivas em terra encontradas no nosso país, esteve conjugada a diversos condicionaismos geográficos, económicos, sociais, históricos e culturais, mas foram os aspectos climáticos, bem como a disponibilidade das matérias-primas que marcaram a distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra em Portugal.

Pela figura 4, pode-se constatar que Portugal se divide em três grandes sectores, Noroeste, Nordeste e abaixo do rio Tejo a região Sul. A região Noroeste é uma zona que com pequenos relevos sofre acções dos ventos do Oceânico Atlântico que lhe confere um clima temperado, com fracas oscilações de temperatura, chuvas abundantes e Verões frescos. A Região Nordeste é uma zona montanhosa que não sofre influência marítima, as características climáticas apresentam grandes oscilações de temperatura, Verões secos e quentes, e Invernos rigorosos com neves e ventos. Na região a Sul do Tejo o clima é mediterrânico, os Invernos temperados com chuvas escassas e Verões muito quentes e secos.

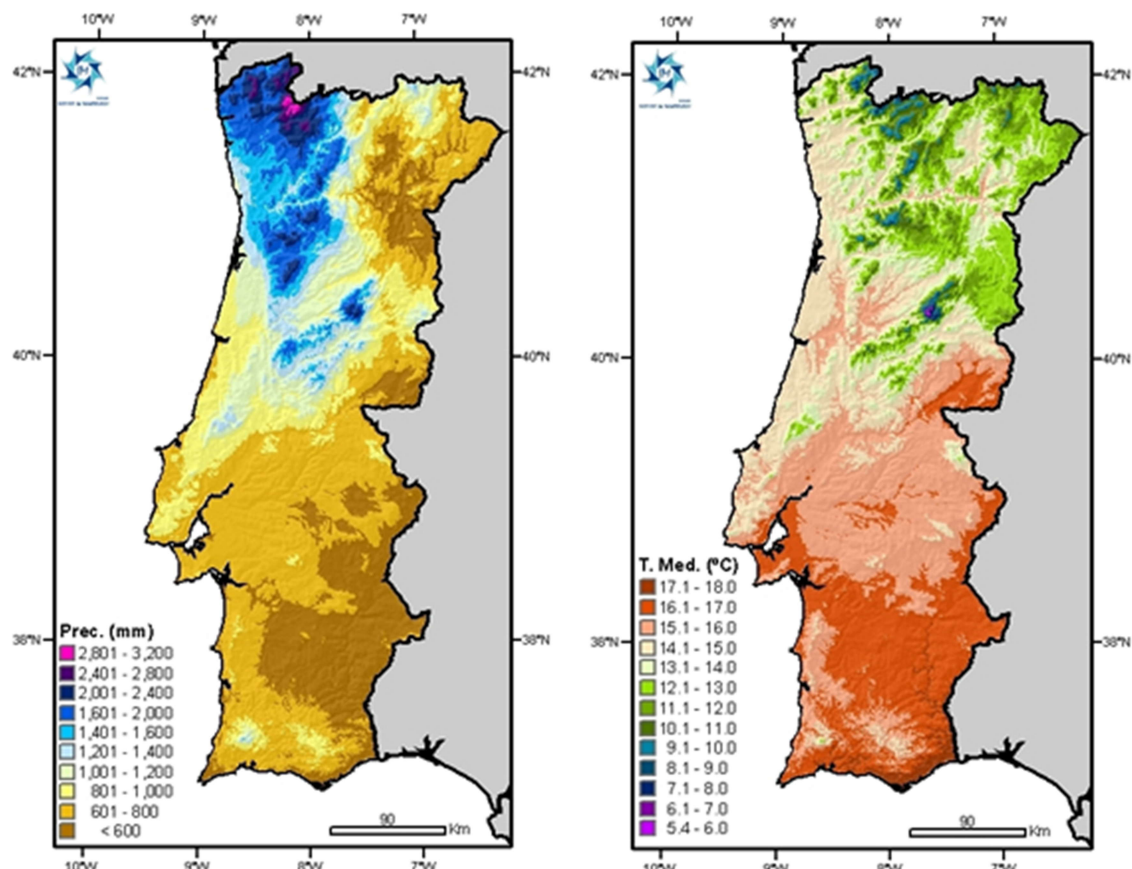


Figura 4: Precipitação total anual e Temperatura média anual, entre 1960 e 1991 em Portugal Continental [14].

O condicionalismo da disponibilidade das matérias-primas predominantes por zona, só quando aliada aos aspectos económicos é que revela a sua influência na disposição geográfica das principais técnicas tradicionais de construção em terra em Portugal, uma vez que este condicionalismo, quando confrontado com os acontecimentos históricos da revolução industrial e a consequente difusão das redes de transportes de mercadorias e pessoas assim como da introdução de materiais de construção industrializados, deixa de ter uma grande influência nessa disposição. Assim sendo, os aspectos económicos condicionaram os tipos de materiais utilizados bem como os sistemas construtivos [15].

2.2.3. Regulamentação portuguesa sobre construções em terra

Diversos são os países que já possuem regulamentação sobre construção em terra. Infelizmente Portugal não se encontra entre eles, muito devido ao estado de aceitação deste tipo de construção no nosso país. A falta de regulamentação da construção em terra em Portugal provoca grandes incertezas quanto à segurança estrutural deste tipo de construções, uma vez que os projectos efectuados com este tipo de técnicas, e remetidos para as Câmaras Municipais para aprovação, não são sujeitos a qualquer tipo de revisão, o que

imputam as responsabilidades das questões da segurança estrutural aos seus projectistas. Para colmatar esta falha legislativa existente no nosso país, é necessário o surgimento de um regulamento nacional de construção em terra, de forma a dissipar todas as dúvidas e ultrapassar todos os problemas que este tipo de construção proporciona.

Perante as condicionantes atrás apresentadas torna-se fundamental o desenvolvimento de novos estudos experimentais que acrescentem informações ao correcto comportamento dos materiais e estruturas. Esses estudos poderão ser importantes bases científicas na correcta avaliação térmica, acústica e estrutural, e poderá sustentar uma calibração mais rigorosa de modelos numéricos.

2.3. O adobe como técnica construtiva

A origem da palavra Adobe advém da palavra árabe “túb” que significa tijolo [15] que foi associada à palavra egípcia “thobe”, secas ao sol. Mais tarde em Espanha foi adoptado o nome pelo qual ainda hoje é conhecido, “adobe” [16].

O adobe é uma técnica de construção em terra que pode ser encontrada em todo o mundo. A versatilidade da sua aplicação permite que este faça parte de diversos elementos de construção, tais como arcos, abóbadas ou paredes [17].

Regra geral, o fabrico do adobe consiste essencialmente em pequenos blocos de terra secos ao sol, enformados em moldes de madeira (de nome tradicional adobeiras) que são desenformados ainda quando se apresentam no seu estado fresco e colocados a secar à temperatura ambiente. A sua constituição é basicamente composta por uma pasta homogénea de terra, areia e água. Podem por vezes também alguns adobes na sua mistura incluir cal, palha, cortiça e eventualmente outros materiais que melhorem as suas características.

O adobe como material de construção usualmente é estabilizado para obter um melhor desempenho mecânico e maior durabilidade, bem como uma resistência reforçada à água, a bactérias e fungos. Para efectuar a estabilização do solo, pode-se usar o meio mecânico ou o meio químico, podendo mesmo recorrer a ambos em simultâneo. Para estabilizar mecanicamente recorre-se à prensagem do solo, e para estabilizar o solo quimicamente é necessário adicionar à mistura da composição do adobe outros materiais como a cal, cimento, cinzas volantes, pozolanas e adições de pequenas quantidades de alguns aditivos de origem orgânica ou mineral. Estabilizar o solo quimicamente permite reduzir o tempo de cura do material o que lhe confere uma adaptação às actuais exigências sociais [18].

As dimensões do adobe não seguem um padrão fixo, embora existam inúmeras tipologias identificadas, regra geral estas variavam sobretudo consoante a sua utilização e região. Em Aveiro, por exemplo, para construção de muros as dimensões médias são aproximadamente $0,45 \times 0,20 \times 0,15 \text{ m}^3$, e para a construção

de casas $0,45 \times 0,30 \times 0,15 \text{ m}^3$ [19]. Se de certa forma universalizarmos as dimensões, concluímos que o comprimento é aproximadamente o dobro da largura [20].

A forma simples de construir em alvenarias de adobe é análoga à forma de construção em alvenarias de tijolo convencional.

A massa de assentamento usada neste tipo de alvenarias em terra geralmente é de resistência mecânica semelhante à da mistura usada nos blocos de terra (adobes).

Estas construções geralmente encontram-se perto de linhas de água, por se tratar de uma técnica com algum consumo de água, bem como a necessidade dos solos usados terem de apresentar características plásticas e argilosas.

2.4. Construção em alvenaria de adobe em Aveiro

Em Portugal existe um vasto património construído em alvenaria de adobe que sobreviveu ao longo dos tempos, localizado sobretudo na zona litoral centro, particularmente no distrito de Aveiro. Os vestígios da utilização deste tipo de alvenaria na construção de edifícios rurais e urbanos, igrejas, armazéns, muros e poços de água, de acordo com informações facultadas pela Câmara Municipal de Aveiro, representam cerca de 25% da construção existente na cidade de Aveiro. Quando nos referimos a todo o distrito estima-se que a percentagem suba para aproximadamente 40% [21].

Actualmente na região de Aveiro é visível o nível de degradação e abandono notório nas construções em adobe, mas são vários os edifícios que por pequenas acções de manutenção continuam a oferecer boas condições de conforto e habitabilidade aos seus habitantes e utilizadores.

O estado de degradação apresentado por alguns edifícios é o reflexo da não conservação do património, bem como o espelho das muitas intervenções de reabilitação erradas, efectuadas para este tipo de alvenaria, muito devido à falta de conhecimento empírico sobre os materiais e técnicas construtivas adequadas a este tipo de estruturas.

Infelizmente, nos dias de hoje, a solução de recurso para fazer frente ao estado actual deste edificado é a demolição. Reabilitar, face à falta de informação sobre as propriedades e caracterização mecânica do adobe e das argamassas, apresenta dificuldades acrescidas pois são necessários estudos técnicos e correctos conhecimentos sobre reabilitação de construções em terra [19]. Para efectuar um bom projecto de reabilitação e reforço deste tipo de alvenaria resistente é necessário recorrer a informações de estudos técnicos efectuados, para se realizar uma melhor interpretação das patologias estruturais mais comuns, bem como para se realizar a calibração de modelos numéricos para uma avaliação da segurança mais rigorosa.

Para preservar a história da cidade e seu património edificado é importante manter os mesmos materiais e opções arquitectónicas das edificações existentes. Para isso é necessário possuir um conhecimento

aprofundado dos materiais utilizados nas construções, para que se possa proceder a uma reabilitação e preservação do património existente.

2.5. Potencial da construção em terra

A construção em terra trata-se de uma solução ecologicamente viável e interessante, uma vez que permite uma construção mais sustentável e uma maior preservação dos recursos naturais. A terra é um material económico, inesgotável, fácil de trabalhar e quando preservado torna-se duradouro. As questões ambientais na construção em terra estão asseguradas, uma vez que existe pouco consumo de energias não renováveis, não contribui para a redução dos recursos de inertes nem para o desenquadramento paisagístico dado que esta técnica construtiva com acabamentos cuidados permite obter construções de arquitectura moderna. A vantagem de ser reciclável exclui a hipótese de formação de entulhos industriais pois a terra volta a ser terra após o final de vida útil do edifício. Para a construção em terra é unicamente necessária mão-de-obra humana e equipamento simples para a produção e aplicação dos blocos, o que viabiliza economicamente este tipo de edificação quando comparada com os métodos correntes de construção. Estas apresentam propriedades higrotérmicas que contribuem para o elevado conforto térmico e para um bom funcionamento bioclimático, devido exclusivamente à grande inércia das suas paredes, apresenta ainda um bom comportamento acústico. Estes factores considerados em conjunto levam à necessidade de baixos consumos energéticos para se manter um ambiente de conforto. As principais limitações deste tipo de construção prendem-se à sua fraca resistência mecânica, ao seu comportamento frágil sob a acção sísmica, o que impossibilita a construção em grande altura, e ao mau comportamento na presença de humidades. Mas estas limitações podem ser combatidas através de disposições construtivas adequadas e processos de estabilização de solos, embora as construções em adobe estejam limitadas em relação a altura total do edifício devido a sua elevada massa. Quanto às disposições construtivas, é necessário garantir um eficiente corte de capilaridade ascensional, bem como uma protecção eficaz das paredes, relativamente ao revestimento adequado e compatível, e aos cuidados a ter com a cobertura, quanto ao seu estado de conservação, sua pendente e prolongamento do beiral.

Uma outra vantagem deste material é o seu óptimo comportamento ao fogo, as alvenarias de terra apresentaram um desempenho suficiente para potencializá-las como paredes corta-fogo para uso em escadas de emergências ou em qualquer local destinado à compartimentação de ambiente, uma vez que este material não é combustível [22].

Contudo os aspectos de ordem cultural e humana podem dar origem ao seguimento de um movimento edificatório, caracterizado pelo ressurgimento da construção em terra, este retorno a velhas técnicas ancestrais que caíram em esquecimento, criando habitações mais ecológicas, e uma construção mais sustentável, utilizando materiais locais, respeitando o património existente [23]. Não existem assim

argumentos possíveis que possam justificar a forma depreciativa com que as pessoas ainda encaram a construção em terra [1].

2.6. A utilização da cortiça em paredes de adobe

Em Portugal, os registos mais antigos referentes à utilização da cortiça na construção em terra, datam finais do século XIV, do povoado da Cola, o Castro da Cola (próximo de Beja).

O emprego da cortiça na construção foi bastante expressivo e abrangente no que toca à Arquitectura Tradicional, mas sobretudo num contexto rural, como ilustra a figura 5.

A aplicação da cortiça em variados elementos construtivos independentes, como paredes, ou coberturas com estrutura em madeira foi bastante usual no território Nacional. Este material foi recorrentemente utilizado, muitas das vezes, associado à terra.

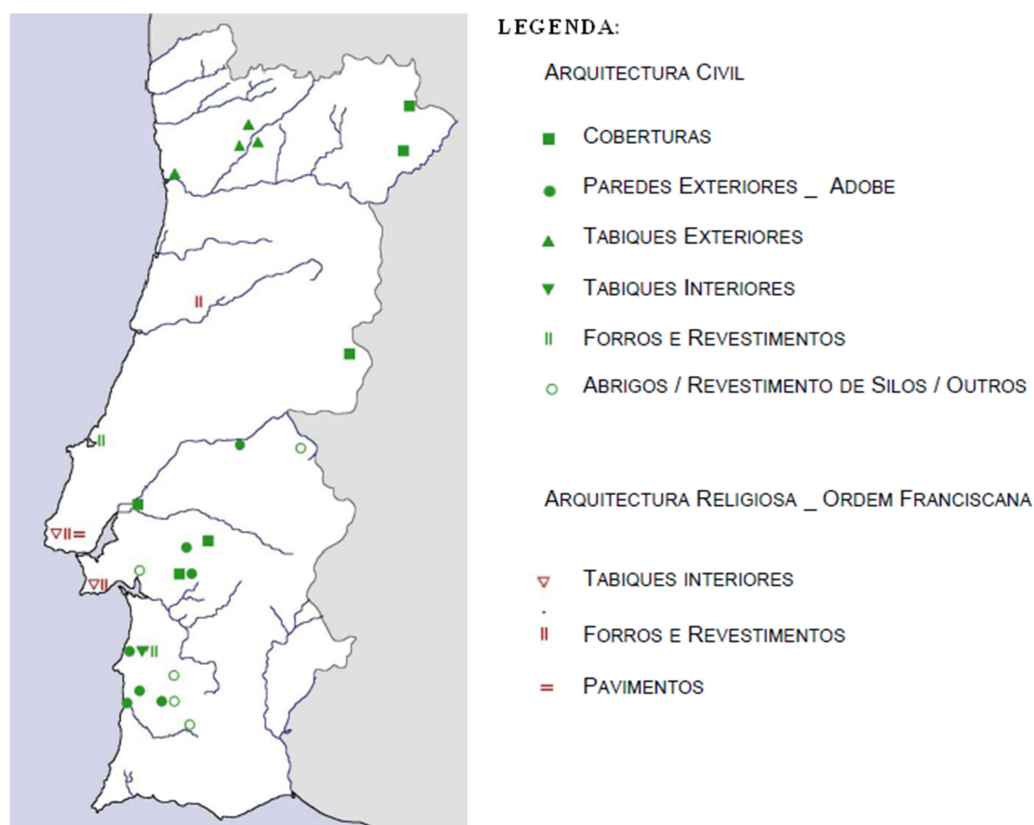


Figura 5: Construções com cortiça em Portugal [24].

Os diversos tipos de paredes em alvenarias de cortiça encontrados estão representados na figura 6.

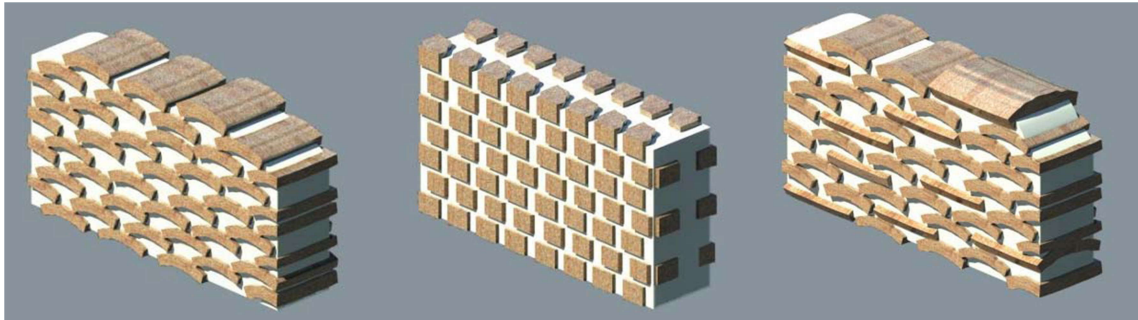


Figura 6: Simulações dos diversos tipos de paredes em alvenarias de cortiça [24].

Nos dias de hoje, é cada vez mais frequente encontrar cortiça na construção, ainda que principalmente sob a forma de derivados e usualmente aplicada em revestimentos e isolamentos. Por se tratar de um material com grande potencial e com características que satisfazem as actuais preocupações ambientais, está a ser alvo de diversos estudos em várias áreas, incluindo a da construção [24].

No capítulo seguinte são dadas algumas noções básicas sobre a térmica, evidenciando as duas propriedades que queremos estudar experimentalmente nesta tese, a inércia térmica e a condutibilidade térmica.

CAPÍTULO 3

Comportamento e desempenho térmico das construções em terra

CAPÍTULO 3 – Comportamento e desempenho térmico das construções em terra

- 3.1. Conforto térmico
- 3.2. Comportamento térmico das construções
 - 3.2.1. Formas de propagação de calor
 - 3.2.2. Transmissões de calor através dos elementos de construção
- 3.3. Inércia térmica nas construções em terra
- 3.4. A terra como PCM natural
- 3.5. Ensaio térmico em construções de adobe
- 3.6. Consumos energéticos e emissões de carbono na construção
- 3.7. Qualidade do ar interior
- 3.8. Regulamentação térmica Decreto-Lei 80/2006 e a adaptabilidade das construções em terra
- 3.9. Incorporação de cortiça como isolamento térmico

3. Comportamento e características térmicas das construções em terra

Este capítulo aborda a questão do conceito de conforto térmico e do comportamento térmico das construções, realçando as propriedades térmicas da terra como material de construção. Apresenta-se a terra como PCM (Phase Change Material), bem como a qualidade do ar interior que este tipo de construção proporciona e os consumos energéticos e emissões de carbono na construção.

São ainda contemplados neste capítulo, alguns estudos já efectuados, de ensaios de controlo térmico do adobe, bem como a adaptabilidade das construções em terra à regulamentação térmica em vigor, decreto-lei 80/2006 [3], destacando também a incorporação de cortiça como isolante térmico.

3.1. Conforto Térmico

O conforto térmico não é um conceito exacto, depende de factores físicos quantificáveis como a estação do ano, temperatura do ar, velocidade do ar, humidade, e de factores pessoais não quantificáveis como estado mental, hábitos e educação entre outros. Assim sendo, as exigências de conforto das pessoas variam muito consoante a sua aclimatização particular ao ambiente local [25].

O conforto térmico é definido como a relação estabelecida entre o ser humano pela sensação de calor ou frio com as condições térmicas que proporcionam essa sensação [26]. As temperaturas internas criadas por sistemas auxiliares de aquecimento ou arrefecimento, com o intuito de alcançar satisfação térmica aos seus ocupantes, estão profundamente relacionadas com o comportamento térmico dos edifícios bem como o consumo energético destes [27].

O cumprimento das normas é fundamental para proporcionar um bom conforto térmico aos seus ocupantes nas suas habitações. Inicialmente as principais preocupações destas normas centralizavam-se na definição das condições de conforto térmico, mas as crescentes preocupações ambientais e a necessidade de desenvolvimento sustentável, levaram estas normas de conforto térmico a ter em consideração a redução dos consumos energéticos dos edifícios [28]. Por outro lado, surgiram também preocupações de cariz ambiental. Com o aumento da utilização de equipamentos para a correcção da climatização dos espaços, verificou-se um aumento dos consumos energéticos e das emissões de dióxido de carbono que consequentemente contribuem para o aquecimento global [29].

3.2. Comportamento térmico das construções

As construções através de todos os seus elementos (paredes, janelas, portas, pavimentos e cobertura) têm a capacidade de absorver todo o tipo de agentes que neles incidam como luz, ar, água e ruído, promovendo o

contraste entre os ambientes exterior e interior. Desta forma o comportamento térmico das construções está directamente dependente das características e propriedades dos seus elementos de construção, mais propriamente a sua massa e taxa de condução de calor que transformam o comportamento térmico num processo dinâmico desfasado temporalmente devido às acções térmicas exteriores, tornando-se assim um processo mais complexo de prever e quantificar [30].

Para uma melhor interpretação do comportamento térmico das construções é necessário ter conhecimento dos modos de propagação do calor nos vários elementos de construção, e dos métodos de previsão das necessidades energéticas dos edifícios contemplados no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [3].

3.2.1. Formas de propagação de calor

O calor pode ser definido como a energia transferida de um sistema para outro devido à diferença de temperatura entre eles. As transmissões de calor podem ser efectuadas segundo três processos distintos, por Condução, por Convecção e por Radiação. A transmissão de calor por condução está intimamente associada às transferências de energia cinética a nível molecular em sólidos, fluidos ou gases. O fluxo de calor realiza-se sempre na direcção da redução da temperatura, como deduzido na Lei de Fourier [31]:

$$= - (\lambda \cdot A) \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (eq.1)$$

em que:

Q_x – Fluxo de calor (Q_x);

A – Área do elemento (m^2);

λ – Condutividade térmica do material ($W/m \cdot ^\circ C$);

$d\theta/dx$ – Gradiente de temperatura ($^\circ C/m$).

A transmissão de calor por convecção está associada às transferências de energia por movimento dos fluidos, à medida que aumenta a velocidade do fluxo do fluido, aumenta a transmissão de calor por convecção. A transmissão de calor por convecção pode ser natural ou forçada.

A convecção natural é originada no interior do fluido devido à falta de homogeneidade da densidade por diferenças de temperatura, já a convecção forçada ocorre quando o fluxo é imposto por fontes externas. A transmissão de calor por radiação é significativamente diferente das anteriores, esta encontra-se relacionada com a transferência de energia por ondas electromagnéticas, não dependendo de qualquer suporte material, ocorrendo entre todos os materiais independentemente da sua fase, sólida, líquida ou gasosa [30].

3.2.2. Transmissões de calor através dos elementos de construção

Para quantificar o fluxo de calor (Q) pelos elementos de construção, conhecidas as temperaturas dos ambientes interiores e exteriores, podemos recorrer à seguinte equação [30]:

$$Q_{cond} = U \cdot A \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext}) \quad (eq.2)$$

em que:

U – Coeficiente de condutibilidade térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

A – Área (m^2);

θ_{int} – Temperatura interior ($^\circ C$);

θ_{ext} – Temperatura exterior ($^\circ C$);

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) de cada elemento envolve todo um conjunto de coeficientes de transmissão de calor relativos aos processos de propagação de calor, condução, convecção e radiação [30]:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se}} \quad (eq.3)$$

em que:

R_{si} – Resistência térmica superficial interior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

R_j – Resistência térmica do elemento j ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

A resistência térmica R_j é calculada pela seguinte equação:

$$R_j = \frac{e}{\lambda} \quad (eq.4)$$

em que:

e – Espessura do elemento (m)

λ – Coeficiente de condutibilidade térmica do material ($W/m \cdot ^\circ C$)

Os valores do coeficiente de transmissão térmica (U) indicados nas tabelas 1 e 2 correspondem a paredes simples de adobe sem revestimentos. Para o seu cálculo foi usado o valor de condutibilidade térmica do adobe, λ de $1,1 W/m \cdot ^\circ C$. [32].

Tabela 1: Coeficientes de transmissão térmica de paredes exteriores em adobe, U [W/(m².°C)] [32].

Paredes exteriores ($R_{se} + R_{si} = 0,17$ [(m ² .°C)/W])						
Tipo de elemento	Espessura da parede sem revestimentos					
	(m)					
	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6
Parede de Adobe	2,26	2,05	1,87	1,73	1,60	1,40

Tabela 2: Coeficientes de transmissão térmica de paredes interiores em adobe, U [W/(m².°C)] [32].

Paredes da envolvente interior ($R_{se} + R_{si} = 0,26$ [(m ² .°C)/W])						
Tipo de elemento	Espessura da parede sem revestimentos					
	(m)					
	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6
Parede de Adobe	1,88	1,73	1,60	1,49	1,40	1,24

3.3. Inércia térmica nas construções em terra

A inércia térmica é a capacidade que as construções possuem para amortecer as acções térmicas exteriores e interiores do edifício, minimizando a variação da temperatura interior, tendo em conta as variações periódicas das acções térmicas exteriores, nomeadamente da temperatura exterior e da radiação solar. O efeito da inércia térmica é importante para o conforto térmico. Um corpo com uma maior massa e/ou com maior calor específico, acumula ou liberta a mesma quantidade de energia com menor variação de temperatura.

A construção em terra devido às suas boas características com elevada higroscopicidade e inércia térmica proporciona níveis de conforto climático interior muito superiores aos da construção em alvenaria de tijolo corrente.

O conforto climático atingido nas construções em terra proporciona um bom ambiente interior, e quando associado a boas soluções de ventilação e de aquecimento passivo, contribui para uma melhor saúde das construções [33].

O desempenho térmico de uma habitação depende muito do resultado final do projecto, não estando exclusivamente dependente do material ou da técnica construtiva, ou mesmo da espessura dos elementos da envolvente da habitação. Vários são os aspectos a considerar como factores climáticos, a orientação da exposição solar, a ventilação, a protecção das paredes e as dimensões das aberturas de janelas e de portas, especialmente se utilizam vidros.

Também a cor da parede pode influenciar o desempenho térmico uma vez que as cores podem reflectir o calor incidente, diminuindo a absorção e consequente transmissão de calor.

A figura 7 e 8 mostram o desempenho térmico de duas habitações distintas. O gráfico da figura 7 representa uma habitação com paredes espessas e poucas aberturas de janelas e portas, o que confere a esta habitação uma maior capacidade de armazenar o calor e uma pequena amplitude térmica no seu interior. Por sua vez a gráfico da figura 8 representa uma habitação com um desempenho térmico contrário ao anterior, uma vez que é constituída por paredes finas e com muitas aberturas de janelas e portas [34].

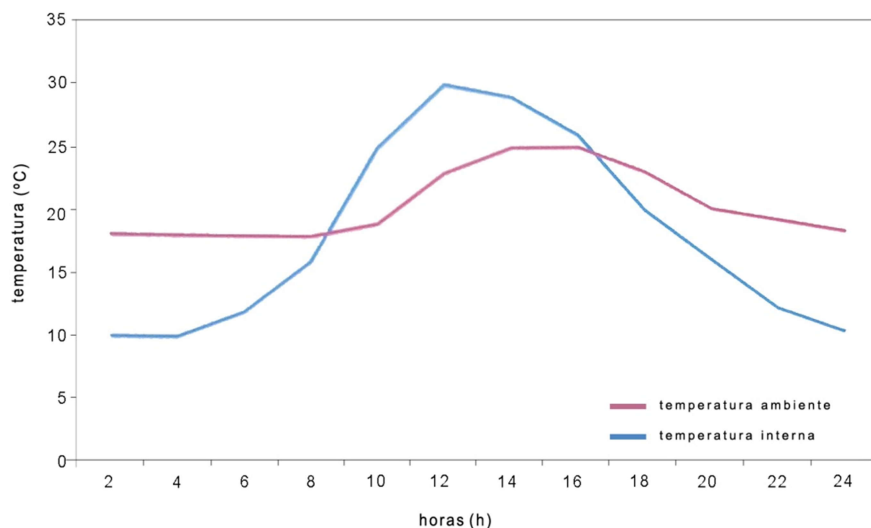


Figura 7: Gráfico de uma pequena amplitude térmica de uma habitação [34].

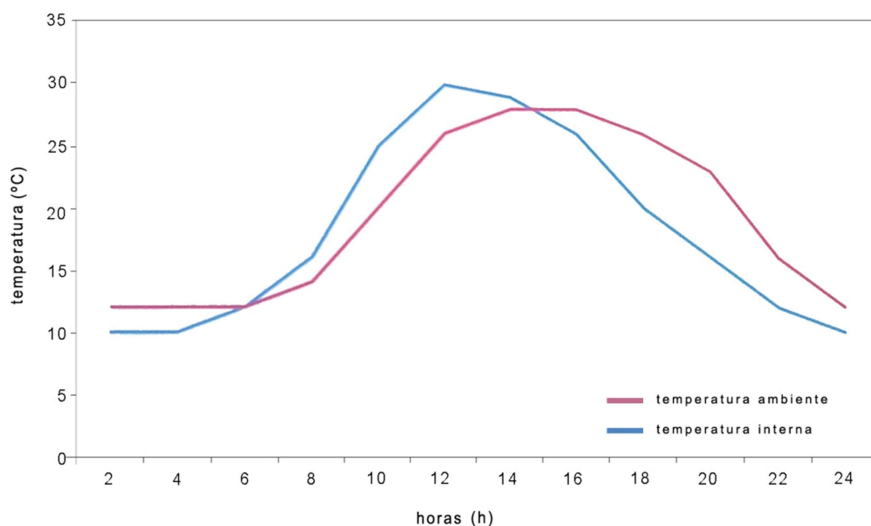


Figura 8: Gráfico de uma grande amplitude térmica de uma habitação [34].

As correcções térmicas podem ser realizadas tanto pelo interior como pelo exterior com eficiências distintas, o problema reside na compatibilização dos materiais de isolamento com a parede de terra, crescendo a necessidade de usar materiais naturais.

3.4. A terra como PCM natural

A terra contém uma certa quantidade de água na sua constituição em equilíbrio com o vapor de água no ar. Esta característica higroscópica da terra explica a razão de uma parede de terra desempenhar o papel de ar-condicionado natural proporcionando um ambiente interior saudável.

O PCM (Phase Change Material) é uma das mais recentes inovações no mundo dos materiais de construção, pois muda de fase em função das mudanças da temperatura ambiente, tal como a água se transforma em gelo aos 0°C. Contudo, a fusão sólido-líquido é acompanhada da absorção de calor do meio ambiente, e a restituição desse calor envolve o processo inverso de solidificação. Este princípio constitui a base para o desenvolvimento físico dos PCM's [35].

Os PCM's podem apresentar-se sob a forma de micro gotas de cera de parafina, micro encapsuladas em polímeros. As gotas são incorporadas em materiais tais como placas de gesso, betão celular, painéis sandwich e muitos mais. A maior diferença entre este material e a água reside na temperatura de fusão, uma vez que a temperatura de fusão dos PCM's pode ser controlada. Quando a temperatura ambiente atinge este limiar a cera incorporada derrete e absorve parte do calor do compartimento cujas paredes são compostas por este material. Pelo contrário, quando a temperatura baixa, a cera solidifica, restituindo ao meio ambiente a temperatura acumulada.

Ao conforto que resulta desta regulação, fica aliada uma economia nos custos da climatização do edifício.

Uma das principais qualidades da terra é o conforto que ela proporciona aos seus habitantes, já que é um material “de mudança de fase” natural. Do ponto de vista natural, torna-se inútil a incorporação de micro gotas de parafina, uma vez que a água existente na sua composição permite alterar as fases da temperatura ambiente.

É certo que a água solidifica aos 0°C e vaporiza aos 100°C, mas essas regras alteram-se de acordo com a espessura das placas de argila. Nesta escala, a água está em equilíbrio com a humidade ambiente, mas com o aumento da temperatura exterior uma parte desta água evapora-se, e por outro lado existe condensação capilar quando a temperatura diminui.

Assim a monoestrutura da terra permite à água uma mudança de fase à temperatura ambiente, quando a temperatura aumenta, a água presente no interior das paredes de terra absorve uma parte do calor do compartimento e evapora-se, quando a temperatura baixa, uma parte da água do meio ambiente condensa-se na terra e restitui a energia que havia acumulado.

A água existente na constituição da terra funciona como se fosse um regulador termo higrométrico, permitindo o controlo da humidade relativa interior. Esta energia própria é infinitamente renovável e proporciona conforto climático. Além disso, a evaporação e a condensação da água constituem trocas energéticas muito mais poderosas do que a fusão e a solidificação da parafina, uma vez que as trocas de energia por cada litro de água que se evapora equivalem às trocas de energia de 22kg de parafina fundida

[35]. No entanto, para que o mecanismo possa funcionar eficientemente é necessário haver trocas rápidas de vapor entre o meio exterior e o interior de uma parede de terra.

Isto implica a existência, além de pequenos poros onde se produzem a condensação e evaporação capilar, de uma rede de canais de maior diâmetro eficazmente ligados entre eles próprios e o exterior. Este tipo de redes é encontrado no solo e em alguns materiais naturais, mas ainda não nos tijolos comuns ou no betão [35].

3.5. Ensaio térmico em construções de adobe

Foi realizado um estudo no México em 2004 onde se pretendia perceber as transmissões térmicas e os diferentes estados de humidade relativa presentes numa construção de terra.

Para esse efeito foram construídas três células de teste, como se pode observar na figura 9. As células de teste possuem as mesmas dimensões, mas são compostas por diferentes materiais. A célula de teste 1 foi construída com blocos de betão, e rebocada com uma argamassa cimentícia, já para a célula de teste 2 usaram na sua construção o adobe tradicional e para a célula de teste 3 recorreram a blocos de terra comprimido (BTC).

A base e a cobertura têm as mesmas características nas três células de teste, constituindo uma fronteira adiabática. Todas as células de teste foram pintadas de branco e expostas às mesmas condições físicas e de insolação.

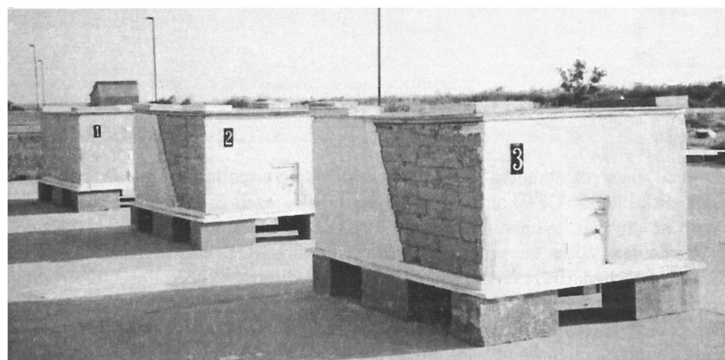


Figura 9: Três células de teste construídas [36].

Os sensores utilizados nos testes “Spectrum 2000” foram colocados dentro das células de teste, adquirindo valores de temperatura e humidade relativa de 3 em 3 horas. A experiência ocorreu de 6 a 11 de Agosto de 2004, durante o período mais prolongado de calor e humidade no Texas.

Foi igualmente colocado um sensor na proximidade das células de teste para que se pudesse avaliar a diferença com a temperatura e humidade relativa externa.

Nas figuras 10 e 11, pode-se observar os resultados dos testes realizados às células de teste 1 e 3.

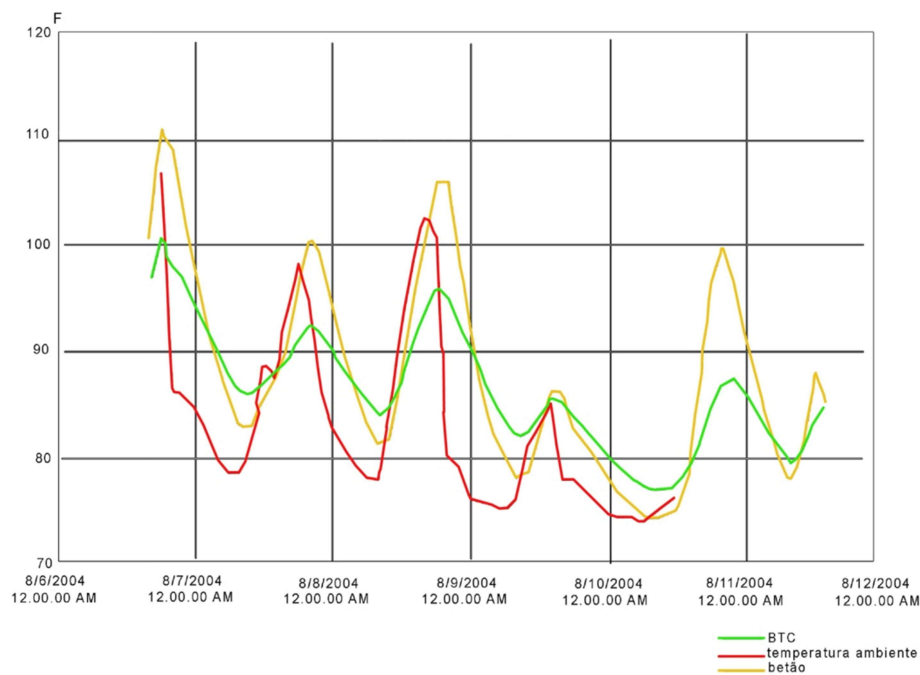


Figura 10: Gráfico das temperaturas registadas de 6 a 11 de Agosto de 2004 [36].

Na célula de betão, as temperaturas recolhidas durante os três dias de maior calor foram superiores às temperaturas do ambiente exterior, enquanto que durante o mesmo período a célula de teste 3 apresentou valores significativamente inferiores: ambiente_41°C, BTC_38°C, betão_43°C.

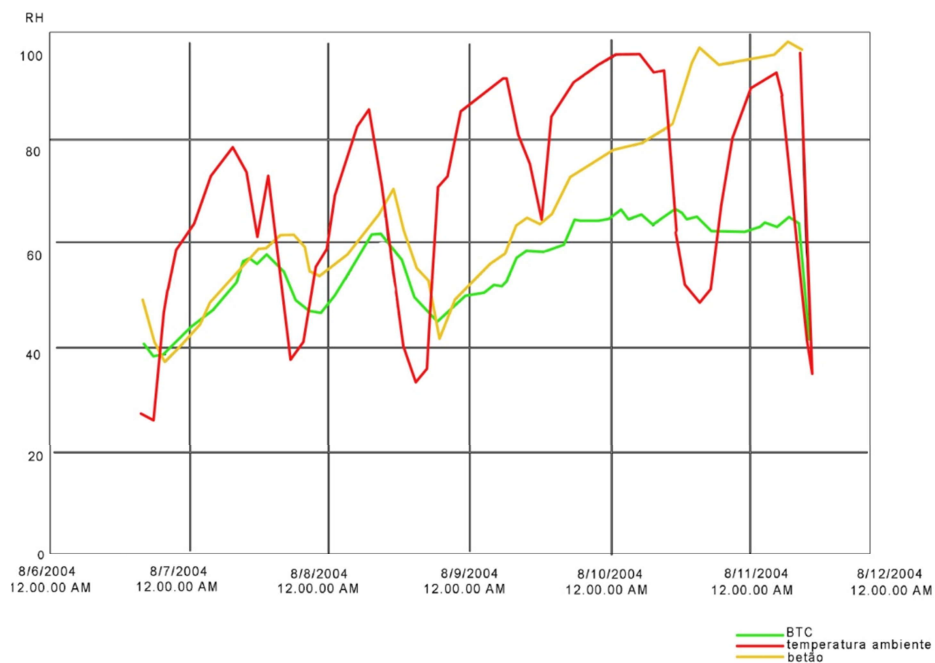


Figura 11: Gráfico de humidades registadas de 6 a 11 de Agosto de 2004 [36].

Quanto à humidade, notou-se um aumento significativo na célula de betão, durante o período quente e húmido de 9 a 11 de Agosto, chegando a valores de 90% de humidade relativa para 37,8°C na célula de teste constituída por blocos de betão. Em contraste, a humidade relativa na célula de teste constituída por BTC's chegou apenas aos 60%.

As duas células de teste mostram assim que existe uma grande diferença a nível de conforto térmico em detrimento das construções em betão, mais usuais. A terra constitui assim um material absorvente de energia térmica, facto que acontece em resposta a uma mudança crítica de temperatura. Este fenómeno diz respeito a uma substância química utilizada para controlar a temperatura em certos materiais (PCM) [37]. A argila existente no adobe pode ser a causa destas qualidades higroscópicas que as construções em terra possuem, funcionando a água como um PCM natural.

3.6. Consumos energéticos e emissões de carbono na construção

A produção dos materiais de construção normalmente exige consumos energéticos significativos que compromete o equilíbrio ambiental. A escolha adequada dos materiais de construção pode significar reduções de quase 30% em termos de emissões de dióxido de carbono na construção de edifícios [38].

Um dos factores que muito contribui para o seu mau desempenho ambiental está directamente relacionado com a energia usada no transporte dos materiais de construção. Desta forma deve-se privilegiar a utilização de materiais locais, à semelhança daquilo que é o paradigma da construção em terra.

Na construção em terra a utilização de solo envolve apenas a remoção de uma camada superficial de terra vegetal podendo esta tarefa ser realizada manualmente não impondo assim um impacto significativo em termos energéticos. O bom desempenho ambiental dos blocos de terra é evidente como mostra a figura 12 que ilustra a comparação entre as emissões de carbono de materiais de construção correntemente utilizados na execução de alvenarias com as emissões equivalentes de blocos de terra [39].

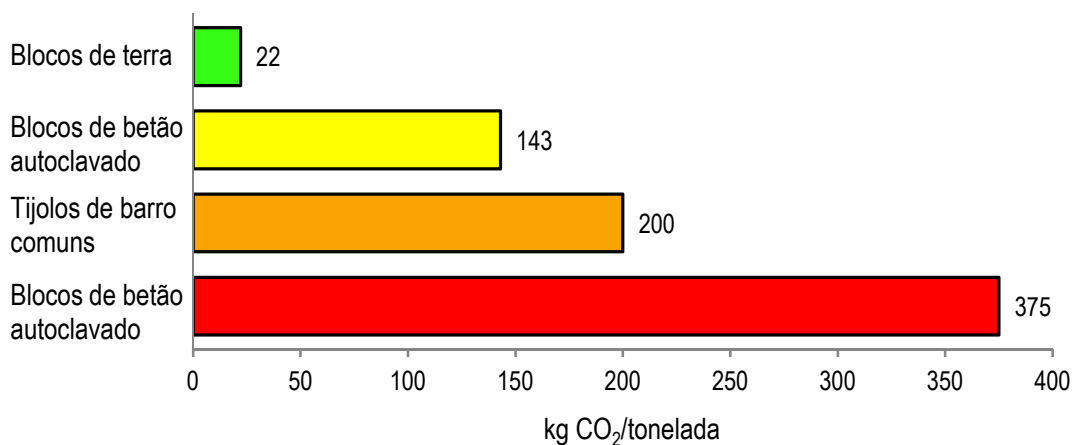


Figura 12: Carbono incorporado em materiais para alvenarias [39].

Para uma habitação com 3 quartos com 92m², com as paredes interiores realizadas em adobe, representa uma redução de 7 toneladas de dióxido de carbono quando comparada à execução das mesmas divisórias com tijolos de barro cozidos, ou mesmo uma redução de 14 toneladas de dióxido de carbono relativamente à execução com blocos de betão autoclavado. Se fosse realizada apenas a substituição de 5% dos blocos de betão utilizados no Reino Unido, por alvenaria de terra provocaria uma redução de emissões de dióxido de carbono na ordem das 100.000 toneladas [39]. Uma habitação em adobe permite uma redução de 100 toneladas de emissões de dióxido de carbono anuais [40].

A produção do cimento exige um consumo de 2,43kW/kg, já a produção do vidro exige consumos maiores de 7,40kW/kg, a terra por sua vez não exige consumos energéticos, consome somente esforço humano [34]. A adopção dos valores de consumos de energia na produção dos diversos materiais de construção é de extrema dificuldade uma vez que são determinados por diferentes procedimentos [41]. Na tabela 3 são apresentados os consumos energéticos relativos à produção de diversos materiais construção.

Tabela 3: Consumo de energia para a produção de diversos materiais de construção [34].

Material	Quantidade	Consumo de energia (KW/h)
Tijolo maciço Ceramico	1 (Tijolo)	3,98
Bloco de Betão	1 (Tijolo)	8,50
Adobe (pr. mecanizada)	1 (Tijolo)	0,73
Adobe (pr. manual)	1 (Tijolo)	0,00

Os consumos de energia ocorrem tanto na produção dos materiais de construção bem como na sua fase de aplicação em obra. Em cada projecto deve-se procurar uma maior eficiência energética das habitações, mantendo as condições de conforto ambiente requerido [34].

3.7. Qualidade do ar interior

As construções em terra apresentam uma grande vantagem no que diz respeito à qualidade do ar interior, estando esta relacionada com a sua capacidade para controlar o nível de humidade relativa [42].

Os blocos de terra têm a capacidade de absorver 10 vezes mais humidade do ar, do que os tijolos cerâmicos tradicionais, como ilustra a figura 13.

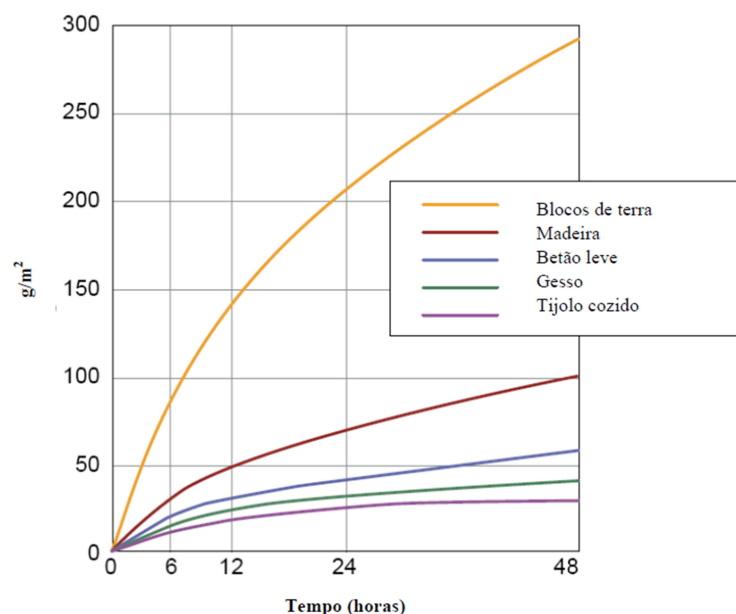


Figura 13: Água absorvida por diferentes materiais quando a humidade relativa sobe de 50 para 80% [42].

A higroscopicidade dos materiais de construção permite uma redução da humidade do ar interior que por vezes se torna mais efectiva do que a utilização de ventilação [43]. As construções em terra conseguem manter os níveis de humidade interior entre 40 a 60%, situando-se assim no intervalo de humidade mais adequado no que diz respeito à saúde humana.

Os edifícios que apresentem elevados ou baixos níveis de humidade relativa aumentam o risco de desenvolvimento de doenças do foro respiratório de diferente natureza nos seus habitantes [44; 45].

3.8. Regulamentação térmica Decreto-Lei 80/2006 e a adaptabilidade das construções em terra

O Decreto-Lei 80/2006 publicado pelo Estado português aprova o novo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [3], estabelecendo regras a observar no projecto de todos os edifícios de habitação e serviços sem sistemas de climatização para que as exigências de conforto térmico sejam alcançadas reduzindo o consumo energético dos edifícios. Tem também como objectivo minimizar as situações patológicas nos elementos de construção originadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, que muitas vezes põem em causa a durabilidade dos elementos de construção e a qualidade do ar interior. Este diploma estabelece índices e parâmetros de caracterização do comportamento térmico dos edifícios. O coeficiente de transmissão térmica máximo admissível de elementos opacos da envolvente dos edifícios não pode ser superior aos valores estabelecidos na tabela 4 [3].

Tabela 4: Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos (U ($W/m^2\text{°C}$)) [3].

Elemento da envolvente	Zona climática		
	l_1	l_2	l_3
Elementos exteriores em zona corrente (incluindo elementos interiores em situações em que $\tau > 0,7$)			
Zonas opacas verticais	1,80	1,60	1,45
Zonas opacas horizontais	1,25	1	0,90
Elementos interiores em zona corrente (para todos os edifícios em zonas anexas não úteis)			
Zonas opacas verticais	2	2	1,90
Zonas opacas horizontais	1,65	1,30	1,20

Os valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos estão divididos em três zonas climáticas de inverno (l_1 , l_2 , l_3). A delimitação destas zonas consta no decreto-lei nº80/2006 de 4 de Abril [3], onde é feita a distribuição dos conselhos de Portugal Continental segundo as zonas climáticas onde se insere o edifício.

A tabela 5 mostra a classificação atribuída da zona climática para o conselho de Aveiro de acordo com o decreto-lei 80/2006 [3].

Tabela 5: Zona climática do conselho de Aveiro [3].

Concelho	Zona climática de inverno	Número de graus-dias ($^{\circ}\text{C.dias}$)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de verão	Temperatura externa do projecto ($^{\circ}\text{C}$)	Amplitude térmica ($^{\circ}\text{C}$)
Aveiro	l_1	1 480	6	V_1	29	9

A adaptabilidade das construções em terra ao decreto-lei 80/2006 de 4 de Abril, de forma a responder às crescentes exigências de conforto higrotérmico, passará pela introdução de isolamento térmico nas paredes exteriores, de modo a minimizar as trocas de calor com o exterior, com consequente redução das necessidades de aquecimento/arrefecimento e diminuição dos riscos de ocorrência de condensações.

Torna-se necessário repensar a construção em terra e as acções de reabilitação, privilegiando o uso de materiais naturais para efeitos de reforço térmico salvaguardando problemas de compatibilidade com a terra.

3.9. Incorporação de cortiça como isolamento térmico

Na sequência do uso de materiais naturais para efeitos de reforço térmico, a cortiça é um material originário de um processo 100% natural, que na sua produção faz recurso da biomassa para satisfazer mais de 90% das suas necessidades energéticas, tornado este material de isolamento uma solução viável no que diz respeito às questões de sustentabilidade que tanto se procura nas nossas construções [46].

A incorporação de cortiça como isolamento térmico tem como principal objectivo o aumento da performance da resistência térmica dos elementos da construção, reduzindo as trocas de calor realizadas entre o interior das construções e o exterior, consequentemente reduzindo as necessidades de aquecimento e de arrefecimento. A cortiça previne ainda o risco de condensações em superfícies com temperatura inferior ao ponto de orvalho.

A cortiça é um isolamento térmico e acústico compatível com a terra, não reage com agentes químicos, possui um bom comportamento ao fogo, e não liberta gases tóxicos.

O aglomerado negro de cortiça é de origem vegetal, de estrutura celular e apresenta-se na sua produção através de placas e a granel. Este material apresenta uma condutibilidade térmica de 0,045 (W/m.°C) [30].

Nos capítulos 4 e 5 seguintes, e à luz desta exploração das construções em terra para o comportamento térmico será apresentado um estudo experimental que consistiu na construção de três células de teste e a sua respectiva monitorização, onde numa das células de teste foi adicionado cortiça na composição do adobe e reboco interior e exterior.

CAPÍTULO 4

Construção das células de teste em alvenaria de adobe

CAPITULO 4 – Construção das células de teste em alvenaria de adobe

- 4.1. Células de teste em alvenaria de adobe
 - 4.1.1. Base e cobertura das células de teste
- 4.2. Caracterização granulométrica
- 4.3. Célula de teste número 1
 - 4.3.1. Processo de produção de adobes
 - 4.3.2. Processo de construção da célula de teste
- 4.4. Célula de teste número 2
 - 4.4.1. Processo de produção de adobes
 - 4.4.2. Processo de construção da célula de teste
- 4.5. Célula de teste número 3
 - 4.5.1. Processo escolha da composição ideal para a adição de cortiça no adobe
 - 4.5.1.1. Caracterização mecânica (ensaio de flexão e de compressão)
 - 4.5.1.2. Determinação do teor em água
 - 4.5.1.3. Aspectos observados nas amostras com adição de cortiça
 - 4.5.1.4. Selecção da composição ideal para a adição de cortiça no adobe
 - 4.5.2. Processo de produção de adobes
 - 4.5.3. Processo de construção da célula de teste
- 4.6. Reboco das células de teste
- 4.7. Transporte das células de teste para o local a realizar os ensaios

4. Construção das células de teste em alvenaria de adobe

Este capítulo apresenta a campanha de ensaios experimentais desenvolvida para a realização deste trabalho destacando o processo realizado até a construção das três células de teste e transporte para o local a realizar o ensaio.

4.1. Células de teste em alvenaria de adobe

Para uma melhor compreensão e caracterização do comportamento térmico das construções em alvenaria de adobe, foram construídas três células de teste em alvenaria de adobe com diferentes composições à escala $\frac{1}{4}$ do real, todas com dimensões idênticas às da casa modelo da figura 14.

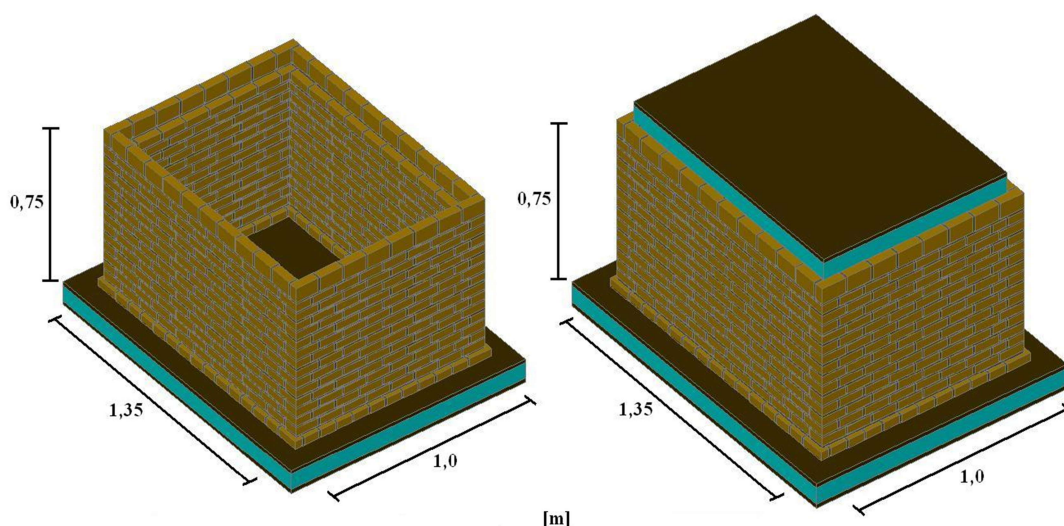


Figura 14: Casa modelo.

Uma vez que as dimensões do adobe não seguem um padrão fixo, foram usadas como referência as dimensões características dos adobes do distrito de Aveiro para a construção de casas $0,45 \times 0,30 \times 0,15 \text{ m}^3$. De acordo com a escala pretendida de $\frac{1}{4}$ do real os adobes para as construções das células de teste ficaram com as dimensões médias de $11,25 \times 7,5 \times 3,75 \text{ cm}^3$.

4.1.1. Base e cobertura das células de teste

A base e a cobertura têm as mesmas características nas três células de teste, simulando uma condição de fronteira adiabática com o intuito de garantir que as trocas de energia se realizem pelas paredes de adobe. Tanto a base como a cobertura são compostas por duas placas de MDF (Medium-density fiberboard) com

dois centímetros de espessura e por duas placas de isolamento térmico em poliestireno extrudido “roofmate” de quatro centímetros, figura15. Estes materiais foram colados com cola própria para o uso em poliestireno.



Figura 15: Materiais da base e cobertura.

As dimensões das coberturas das células de teste são $1,21 \times 0,88 \times 0,12 \text{ m}^3$, como ilustra a figura 16.

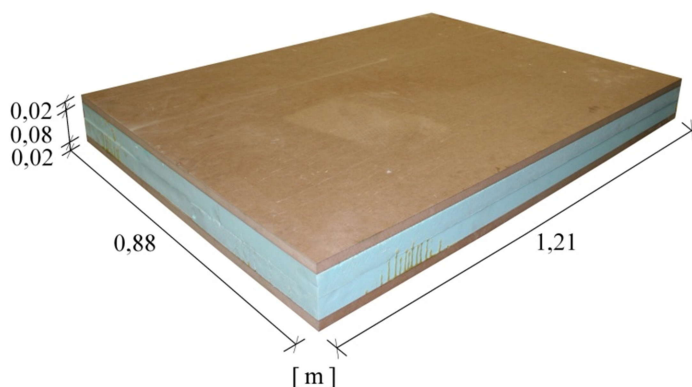


Figura 16: Cobertura das células de teste.

Para facilitar a deslocação e o posicionamento final nas células de teste procedeu-se à aplicação de dois puxadores na parte superior de cada cobertura, como ilustram as figuras 17 e 18.

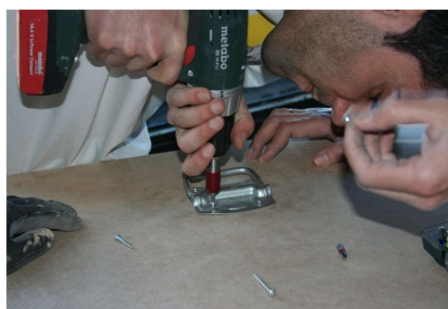


Figura 17: Colocação dos puxadores.



Figura 18: Cobertura com os puxadores.

Seguidamente no centro da parte inferior de cada cobertura, foi instalado um pequeno varão de ferro roscado com trinta centímetros de comprimento, como ilustra a figura 19, para garantir a centralização e fixação do sensor na célula de teste.



Figura 19: Parte inferior da cobertura.

As dimensões das bases das células de teste são $1,55 \times 1,21 \times 0,12 \text{ m}^3$, como representado na figura 20.

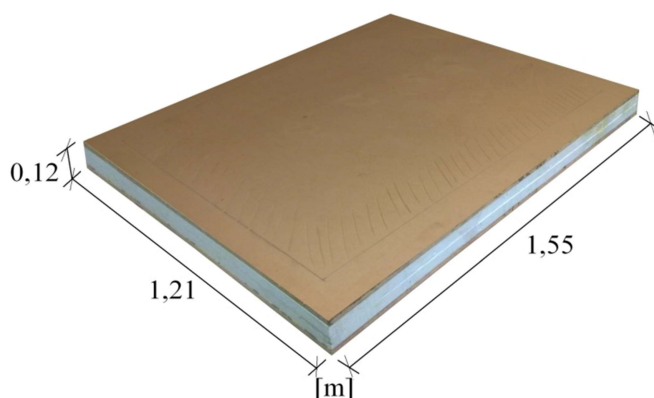


Figura 20: Base das células de teste.

Foram criadas rugosidades através de cortes efectuados nas bases, como se pode observar nas figuras 21, para se garantir uma melhor aderência da construção à base. As bases das três células de teste ficaram assentes sobre estrados de madeira, para facilitar movimentações após a conclusão das construções das células de teste.



Figura 21: Cortes nas bases.

4.2. Caracterização granulométrica

Para a determinação da curva granulométrica da terra e da areia a usar para a produção dos adobes, da argamassa e do reboco, foi usada uma amostra de 1000g, de acordo com a norma de peneiração NP EN 933-1 [47]. Determinou-se a curva granulométrica da terra, figura 22, e através do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), classificou-se a amostra de terra, como bem graduada [48].

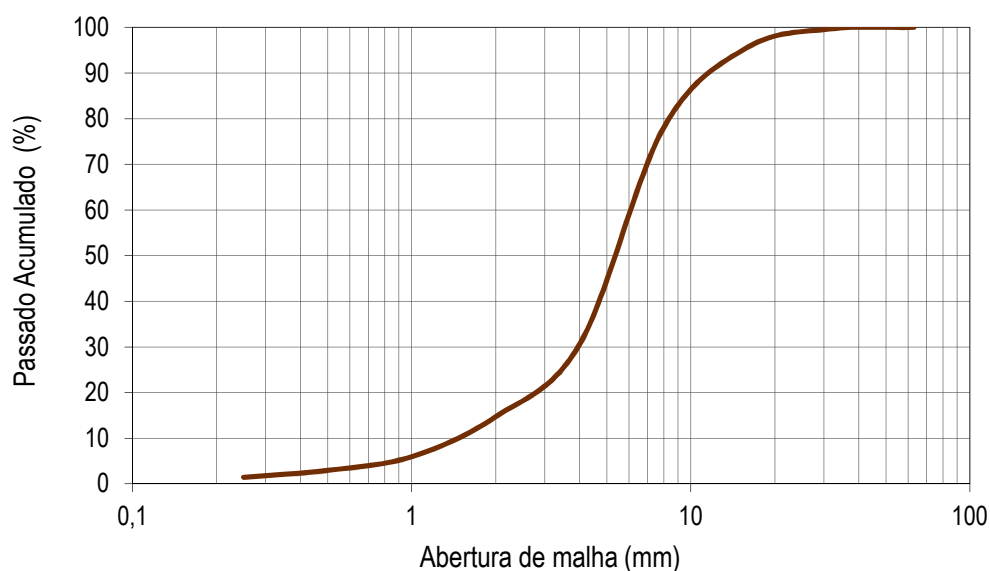


Figura 22: Curva granulométrica da terra.

Na determinação da curva granulométrica da areia, figura 23, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), a amostra foi classificada, como bem graduada e com excelente trabalhabilidade como material de construção [48].

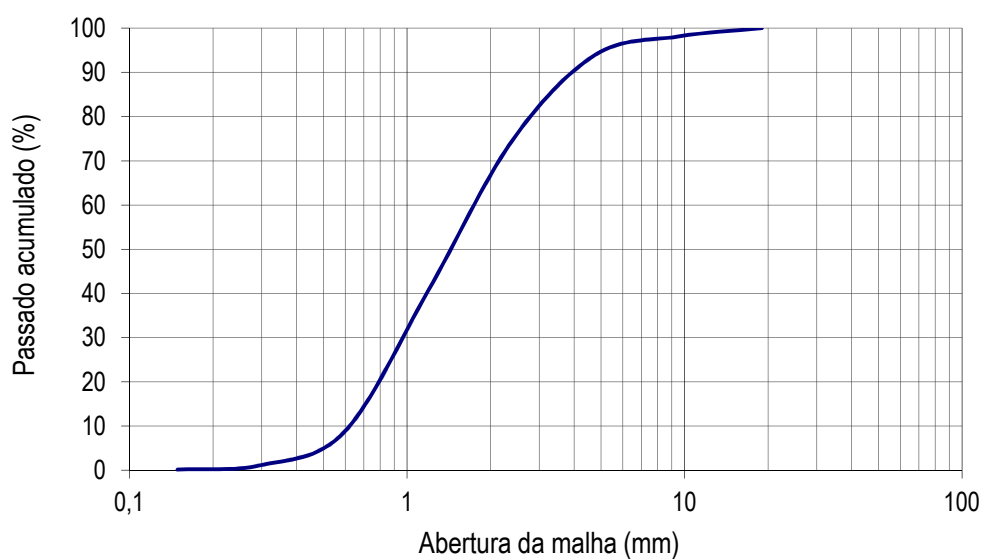


Figura 23: Curva granulométrica da areia.

4.3. Célula de teste número 1

A célula de teste número 1 foi construída em alvenaria de adobe, com blocos produzidos em laboratório. Os blocos de adobe usados na construção desta célula de teste, têm uma composição similar aos blocos de adobe das construções existentes no distrito de Aveiro, com um traço em volume de 1:1:2 (cal hidratada, terra ligeiramente argilosa e areia)

4.3.1. Processo de produção de adobes

A produção do adobe foi efectuada de forma manual, sendo necessário se proceder à construção de um molde em madeira (adobeira), figura 24, com as dimensões de cada adobe à escala de $\frac{1}{4}$ do real, figura 25.



Figura 24: Adobeira usada.

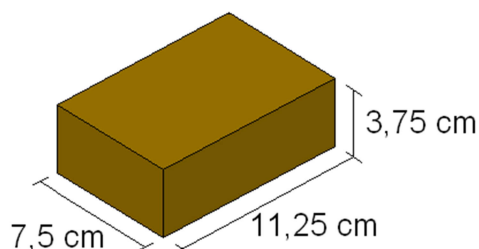


Figura 25: Dimensões dos adobes à escala $\frac{1}{4}$ do real.

Começou por se misturar a seco todos os componentes sendo de seguida adicionada água até se obter a consistência desejada. Posteriormente foi molhado o molde de adobes e colocada a mistura manualmente, até os dezasseis compartimentos estarem completamente cheios e ligeiramente compactados, como ilustra a figura 26. De seguida o molde de madeira foi imediatamente retirado deixando cada bloco já com a forma final em processo de cura.



Figura 26: Enchimento do molde de adobes.

Esta operação foi repetida inúmeras vezes até se obter o número de adobes necessários para se proceder a construção da célula de teste número 1. Os blocos de adobe de dois em dois dias foram virados, para que a secagem das suas superfícies se procedesse de uma forma semelhante. Após trinta dias de cura, foram empilhados numa paleta para se efectuar o transporte para o local onde se iria proceder à construção da célula de teste número 1, como ilustra a figura 27.



Figura 27: Secagem dos adobes e acondicionamento na paleta para transporte.

4.3.2. Processo de construção da célula de teste

Para a construção da célula de teste número 1, foi produzida uma argamassa de assentamento com a mesma composição da mistura usada na produção dos adobes.

Começou-se por molhar a base e colocar argamassa de assentamento para se iniciar a construção. A primeira fiada de blocos de adobe foi colocada de forma perpendicular às arestas da base, funcionando como fundação de suporte da célula, como ilustra a figura 28.



Figura 28: Fase inicial da construção da célula de teste número 1.

Em seguida, assentou-se fiada a fiada todos os adobes construídos paralelamente à base de forma análoga à construção em alvenaria de tijolo, figura 29, até se obter as dimensões pretendidas da casa modelo. A última fiada foi colocada com os blocos ao alto criando-se uma ranhura para receber a cobertura e minimizar possíveis perdas térmicas.



Figura 29: Fase final da construção da célula de teste número 1.

4.4. Célula de teste número 2

A célula de teste número 2 foi construída com blocos cortados, de adobes já existentes, originários de uma demolição que ocorreu na zona de Aveiro.

4.4.1. Processo de produção de adobes

Nesta segunda célula de teste, a premissa foram os adobes existentes, foi por isso necessário cortá-los, criando-se novos adobes com as dimensões dos adobes produzidos para a construção da célula de teste número 1. Nas figuras 30 e 31 pode-se observar o processo de corte dos adobes.



Figura 30: Processo de corte dos adobes existentes para a construção da segunda célula de teste.



Figura 31: Processo de corte dos adobes existentes para a construção da segunda célula de teste.

4.4.2. Processo de construção da célula de teste

Para a construção da célula de teste número 2, foi usada uma argamassa de assentamento idêntica à usada na construção da primeira célula de teste e nas construções existentes.

O processo de construção foi idêntico ao processo efectuado na construção da célula de teste número 1. Na figura 32 podem-se observar algumas fases do processo de construção desta célula de teste.



Figura 32: Diferentes fases da construção da célula de teste número 2.

4.5. Célula de teste número 3

A célula de teste número 3 foi construída com blocos de adobe com adição de cortiça. Para este efeito foi necessário encontrar a composição ideal de adição de cortiça no adobe.

4.5.1. Processo escolha da composição ideal para a adição de cortiça no adobe

Para se encontrar a composição ideal de adição de cortiça nos adobes, foi usada como mistura base a composição dos blocos de adobe da célula de teste número1 à qual se adicionou diferentes percentagens e granulometrias de cortiça, em relação ao peso total da amostra. Realizaram-se 6 amostras de acordo com a tabela 6.

Tabela 6: Amostras das várias composições de adição de cortiça no adobe.

Amostras	Cortiça adicionada (%)	Traço						
		Terra (gr)	Areia (gr)	Cal Aérea (gr)	Cal Hidráulica (gr)	1mm (gr)	Cortiça 2mm (gr)	4mm (gr)
A1	0,5	500	1112,82	176,82	31,55	-	-	9,11
A2	1,0	500	1112,82	176,82	31,55	-	-	18,21
A3	2,0	500	1112,82	176,82	31,55	-	-	36,42
A4	2,0	500	1112,82	176,82	31,55	-	18,21	18,21
A5	2,0	500	1112,82	176,82	31,55	18,21	18,21	-
A6	1,0	500	1112,82	176,82	31,55	-	18,21	-

Na figura 33 podem-se observar os vários componentes usados na produção das amostras.



Figura 33: Componentes das amostras.

A cortiça usada nestes ensaios esteve sujeita a um controlo laboratorial de granulometria.

4.5.1.1. Caracterização mecânica (ensaios de flexão e de compressão)

Para se avaliar a resistência mecânica à flexão e à compressão das diferentes amostras, procedeu-se à produção de provetes prismáticos, utilizando-se moldes metálicos com as dimensões normalizadas 4×4×16 [cm]. Os provetes foram sujeitos às mesmas condições para garantir a fiabilidade dos resultados na sua caracterização em termos comparativos.

Foram realizados ensaios de flexão e de compressão, como se ilustra nas figuras 34 e 35.

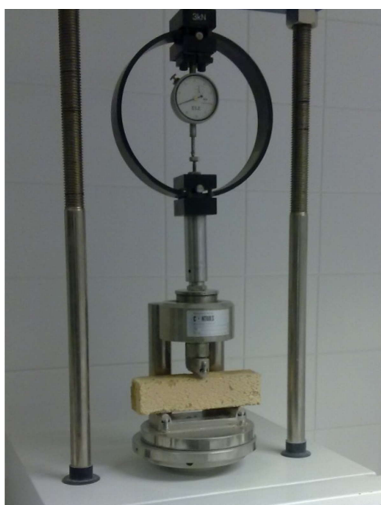


Figura 34: Ensaio de Flexão.



Figura 35: Ensaio de compressão.

No ensaio de resistência mecânica à flexão, figura 34, o posicionamento dos provetes é realizado de forma centrada relativamente ao ponto de aplicação da força (a meio vão) e perpendicularmente aos apoios nas extremidades. Seguidamente é accionado o movimento descendente do cutelo da máquina até que se estabeleça o contacto com a face do provete e, posteriormente, procede-se à aplicação de uma força à velocidade constante de 1mm/seg., de forma contínua. O valor da força de rotura do provete corresponde ao pico de força atingido. Do tratamento dos resultados obtidos construiu-se o gráfico da figura 36 com os valores da tensão de rotura em flexão dos provetes ensaiados.

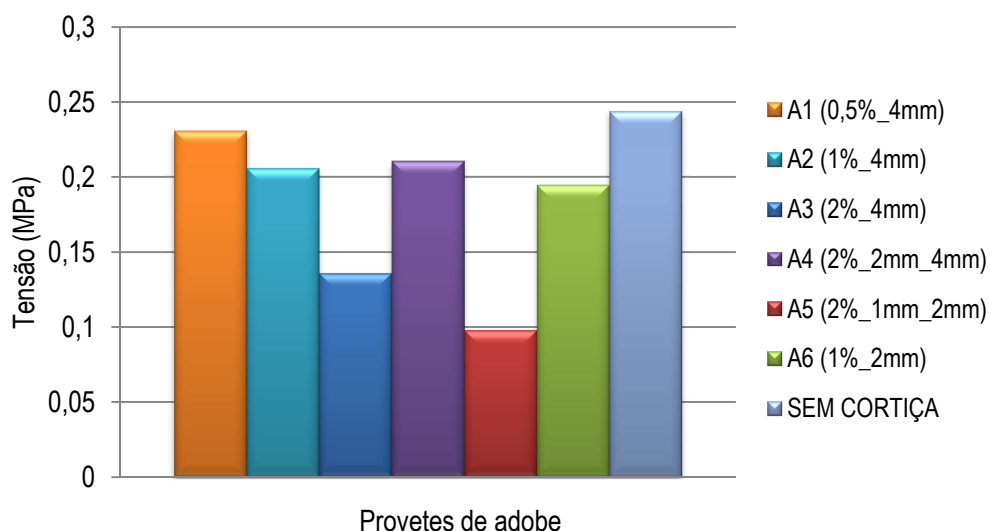


Figura 36: Resultados do ensaio de flexão aos 14 dias.

Para realizarmos o ensaio de resistência à compressão, são usados as duas metades do prisma resultantes do ensaio à flexão. Estas são colocadas de forma centrada na base de ensaio da máquina. Posteriormente, é

accionado o movimento descendente da superfície superior de ensaio da máquina, até esta entrar em contacto com a face superior do provete, aplicando-se uma velocidade constante, de forma contínua, até à rotura do provete, figura 35. Do tratamento dos resultados obtidos construiu-se o gráfico da figura 37 com os valores da tensão de rotura de compressão dos provetes ensaiados.

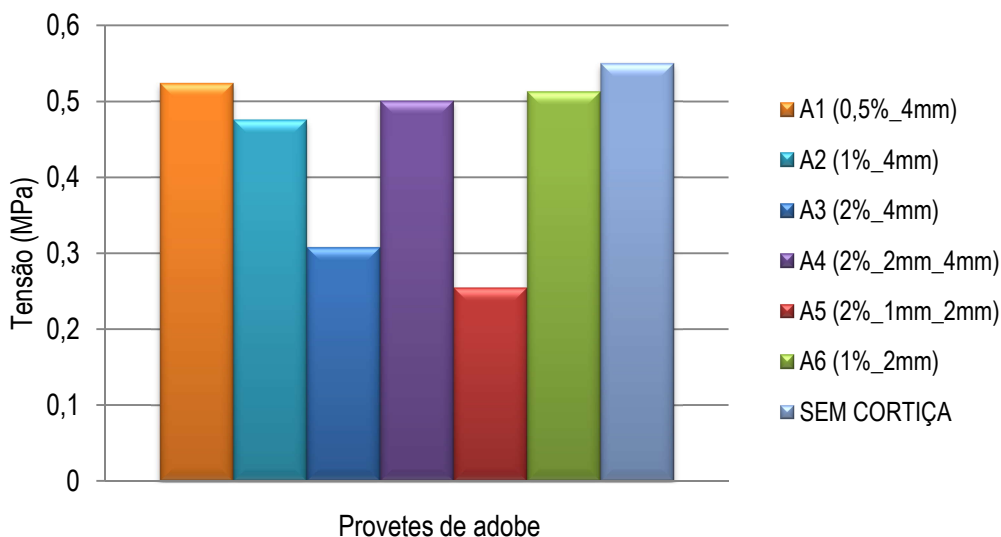


Figura 37: Resultados do ensaio de compressão aos 14 dias.

4.5.1.2. Determinação do teor em água

O objectivo deste ensaio é avaliar a percentagem de água absorvida por determinado provete após imersão em água. A determinação do teor em água foi efectuada com base numa amostra de provetes prismáticos retirada para o efeito de cada uma das amostras dos adobes em estudo. Na realização do ensaio foram considerados os procedimentos especificados na ISO/TS 17892-1:2004 [49]. Começou por se colocar os provetes de adobe na estufa até a sua massa atingir valor constante, seguidamente os provetes foram transferidos para um excicador, devidamente isolado, onde se iniciou um processo de arrefecimento durante 24 horas, à temperatura ambiente, sem ganho de humidade. Quando retirados do excicador, foi efectuada a pesagem dos provetes avaliando a sua massa seca. De seguida procedeu-se à imersão dos provetes em água, durante 48 horas. Posteriormente retiram-se os provetes da água, e com o auxílio de um pano húmido removeu-se a água em excesso, e efectuiu-se a pesagem do provete.

O teor em água (W), é obtido da seguinte forma:

$$W = \frac{m_{\text{saturado}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{seco}}} \times 100 \quad [\%] \quad (\text{eq.5})$$

em que:

m_{seco} – Massa do provete seco (gr)

m_{saturado} – Massa do provete saturado (gr)

Do tratamento dos resultados obtidos construiu-se o gráfico da figura 38.

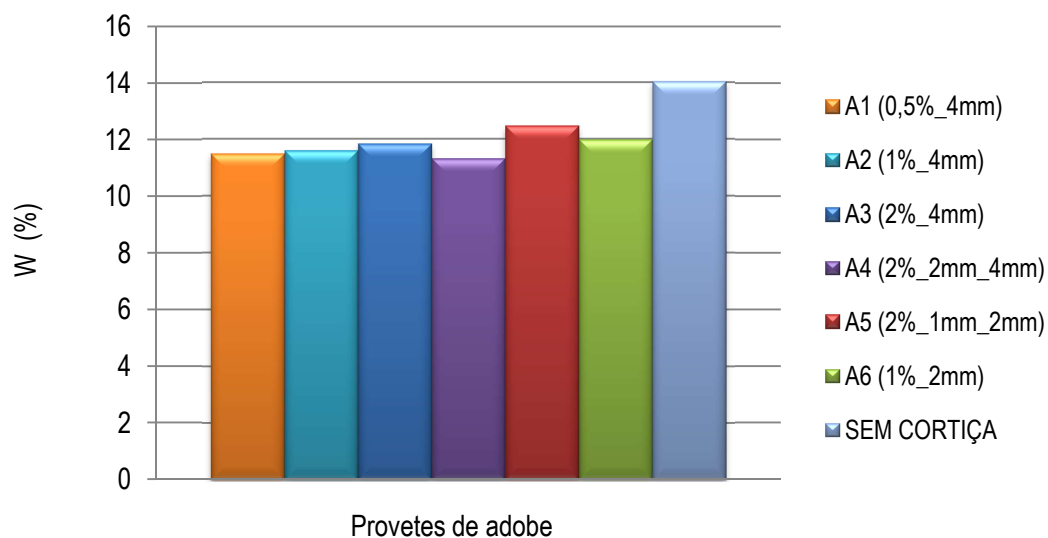


Figura 38: Resultados do ensaio do teor em água.

4.5.1.3. Aspectos observados nas amostras com adição de cortiça

A adição de cortiça no adobe provocou uma redução substancial de peso do adobe, em média esta redução de peso foi cerca de 20%. A figura 39 ilustra os pesos das diferentes amostras com adição de adobe.

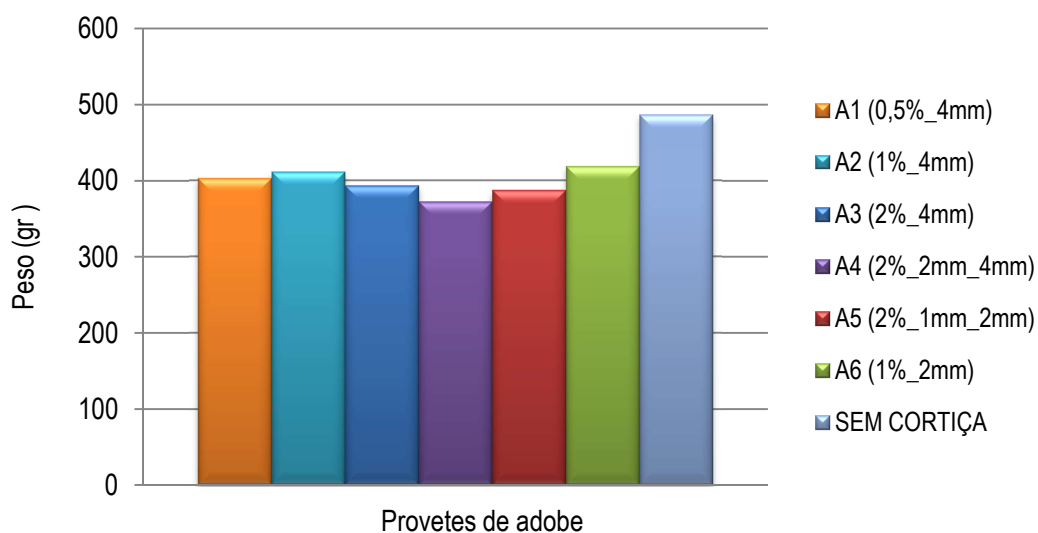


Figura 39: Pesos das amostras.

4.5.1.4. Selecção da composição ideal para a adição de cortiça no adobe

Após vários ensaios realizados, foi definida uma relação otimizada entre a resistência mecânica e o teor em água, com o intuito de alcançar uma tendência de valor óptimo de percentagem de cortiça a incorporar no adobe, como ilustra a figura 40

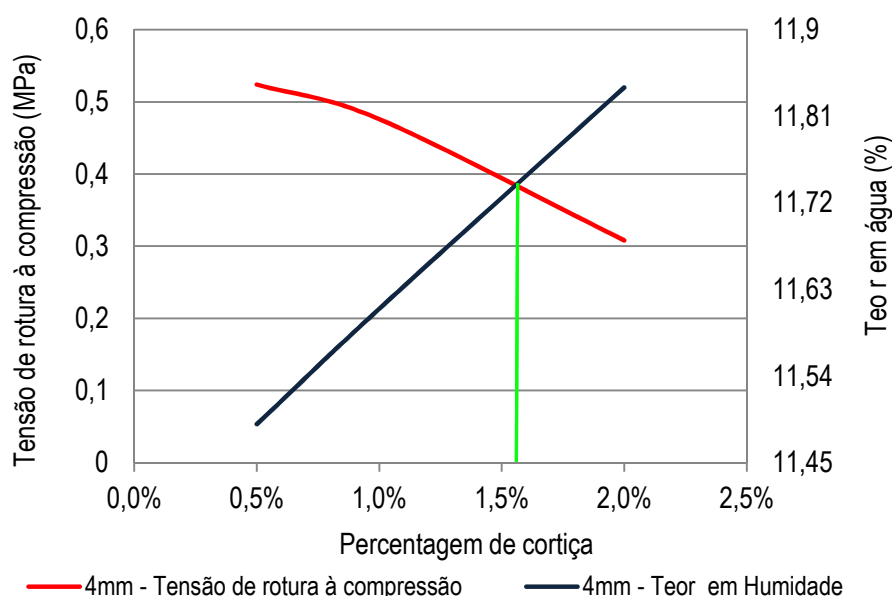


Figura 40: Relação otimizada entre a resistência mecânica e o teor em água

Verificou-se que para uma granulometria de 4mm a percentagem de adição óptima de cortiça no adobe seria de 1,55%. Após a análise de todas as amostras constatou-se que a adição de cortiça da amostra A1 (na percentagem de 0,5% em relação ao peso total da amostra com granulometria de 4mm) e da amostra A4 (na percentagem de 2% em relação ao peso total da amostra com uma mistura de duas granulometrias de 2mm e 4mm) possuíram um melhor desempenho quando equiparadas às restantes amostras.

Uma vez que o trabalho realizado empreende como objectivo o estudo do comportamento térmico, a escolha da composição ideal para a adição de cortiça no adobe recaiu para a amostra A4 devido a esta ter uma maior percentagem e mistura de diferentes granulometrias de cortiça, quando comparada com a amostra A1, aproximando-se assim da percentagem otimizada de 1,55% de cortiça de granulometria de 4mm, na expectativa de um melhor comportamento a nível térmico sem comprometer demasiadamente a resistência mecânica.

4.5.2. Processo de produção de adobes

Encontrada a composição ideal para a adição de cortiça nos adobes, iniciou-se o processo de produção dos mesmos para a construção da terceira e última célula de teste. O processo foi idêntico ao efectuado na produção dos adobes da célula de teste número 1.

4.5.3. Processo de construção da célula de teste

Para a construção da célula de teste número 3, foi usada uma argamassa de assentamento com composição semelhante à mistura usada para realizar os adobes desta célula de teste (com cortiça incluída na sua composição). O processo de construção foi idêntico ao processo efectuado na construção das células de teste número 1 e 2, como ilustra a figura 41.



Figura 41: Diferentes fases da construção da célula de teste número 3.

4.6. Reboco das células de teste

Passados trinta dias após a última construção foi realizado o reboco das três células de teste, como ilustram as figuras 42 e 43. A mistura usada no reboco de cada uma delas é idêntica à argamassa de assentamento da célula de teste respectiva.

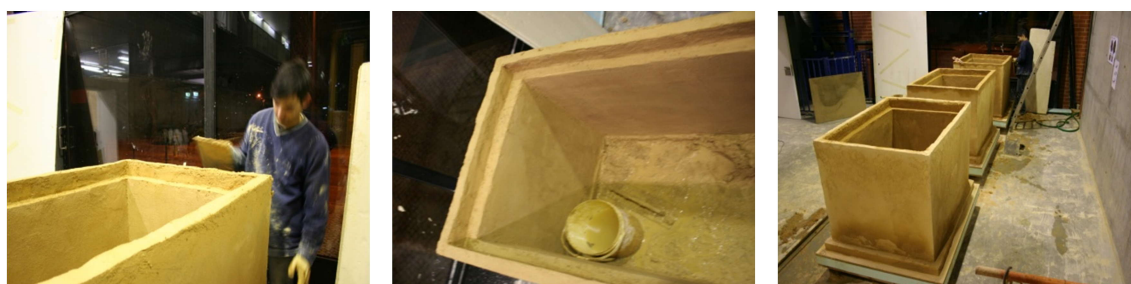


Figura 42: Reboco das três células de teste.



Figura 43: Reboco das três células de teste.

4.7. Transporte das células de teste para o local a realizar os ensaios

Para a realização dos ensaios, foi necessário transportar as células de teste para o exterior do laboratório do Departamento de Engenharia Civil. A escolha da localização das células de teste foi influenciada pela necessidade de proteger o equipamento de instrumentação.

O transporte das células de teste foi efectuado com um empilhador, o qual realizou a manobra de transporte de uma forma muito lenta e com as células de teste devidamente cintadas, observando-se o processo ilustrado na figura 44.



Figura 44: Transporte das três células de teste para o exterior.

CAPÍTULO 5

Instrumentação das células de teste e resultados obtidos

CAPITULO 5 – Instrumentação das células de teste e resultados obtidos

- 5.1. Sistema de monitorização e aquisição de dados
- 5.2. Processo de instrumentação das células de teste
- 5.3. Resultados obtidos
 - 5.3.1. Condicionantes do ensaio
 - 5.3.2. Análise climatérica do mês de Maio
 - 5.3.2.1. Temperatura
 - 5.3.2.2. Precipitação
 - 5.3.2.3. Radiação
 - 5.3.3. Análise dos resultados obtidos
 - 5.3.3.1. Dia 1 de Maio de 2010
 - 5.3.3.2. Dia 5 de Maio de 2010
 - 5.3.3.3. Dia 10 de Maio de 2010
 - 5.3.3.4. Dia 13 de Maio de 2010
 - 5.3.3.5. Dia 21 de Maio de 2010
 - 5.3.3.5. Dia 22 de Maio de 2010
 - 5.3.4. Resultado do cálculo da condutibilidade térmica das diferentes células de teste
 - 5.3.5. Comentário final

5. Instrumentação das células de teste e resultados obtidos

Neste capítulo como já foi referido no capítulo 3, devido à existente necessidade de se caracterizar a inércia térmica deste tipo de construções e conhecer bem a propriedade termofísica, λ , para se realizar o cálculo térmico, procedeu-se à construção de três células de teste que foram detalhadamente descritas no capítulo 4. Este capítulo 5, inicia-se com a apresentação do sistema de monitorização e aquisição de dados fazendo referência à metodologia seguida para o posicionamento dos sensores. São apresentados ainda os resultados e a análise dos dados tratados da monitorização das três células de teste referentes ao mês de Maio.

5.1. Sistema de monitorização e aquisição de dados

O Sistema de monitorização e aquisição de dados usado, (ver figura 45), monitoriza e regista as temperaturas através de dois “*dataloggers*” da marca ICP.

O sistema permite registar temperaturas em 12 pontos em simultâneo com uma precisão de 0,01 °C, através de sensores do tipo PT100.

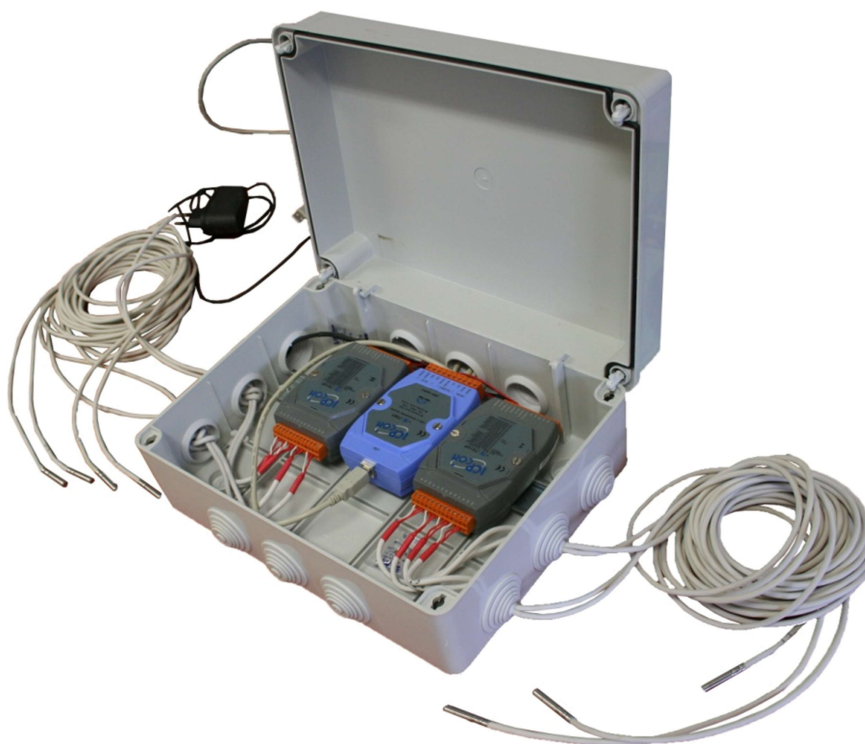


Figura 45: Sistema de monitorização e aquisição de dados.

Os sensores PT100 garantem uma precisão elevada e permitem um amplo registo de temperaturas (≈ -100 a $+200$ °C) em meios sólidos e líquidos, uma vez que possuem as pontas de prova encapsuladas (liga metálica).

5.2. Processo de instrumentação das células de teste

Para a instrumentação das três células de teste foram distribuídos quatro sensores PT100 por célula. Procedeu-se a realização de um pequeno orifício numa das paredes para passarem os fios para o interior da célula de teste, sendo o posicionamento dos sensores PT100 efectuado de acordo com as marcações a verde da figura 46, colocando-se um sensor PT100 no centro da célula, outro na superfície interior da parede, outro dentro da parede e um outro junto a superfície exterior da célula de teste, todos orientados na mesma direcção no sentido da parede.

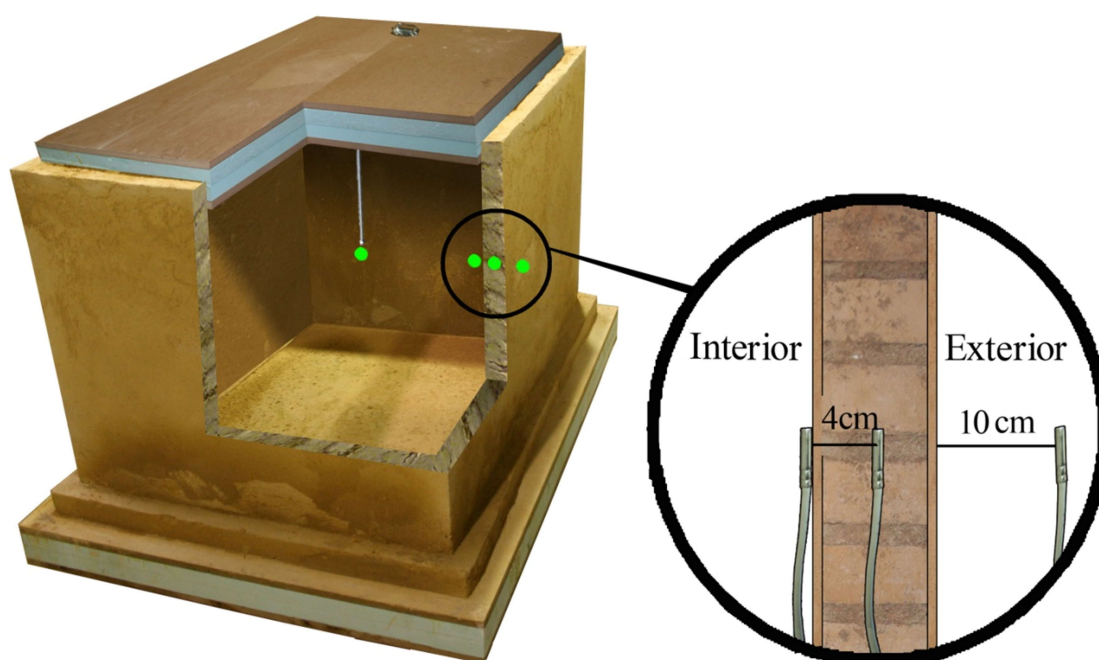


Figura 46: Posicionamento dos sensores PT100 na célula de teste.

Após a instrumentação das três células de teste, (ver figura 47), foi realizado o fecho do isolamento tanto da cobertura como do orifício por onde passaram os fios para o interior da célula, com poliuretano, como se ilustra na figura 48.



Figura 47: Instrumentação das células de teste.



Figura 48: Fecho e isolamento das células de teste.

5.3. Resultados obtidos

A interpretação dos resultados irá ser feita á luz das diversas variáveis que explicam o comportamento das três células de teste nos diferentes dias do mês de Maio com condições de fronteira diferentes: temperatura exterior, radiação, convecção exterior, nebulosidade, humidade relativa.

5.3.1. Condicionantes do ensaio

As três células de teste padeciam de elementos perturbadores correspondentes à geometria dos edifícios do Departamento de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Estes só permitiam que as células de teste estivessem expostas a radiação directa entre as 14h e as 18h40m, uma vez que as suas sombras até então não o permitiam. No desenho esquemático da figura 49 é

perceptível o posicionamento do sol ao longo do dia em relação às células de teste. A figura 50 ilustra a sombra provocada pelo Departamento de Engenharia Civil sobre as células de teste no início da exposição solar às 14h, expondo as três células de teste de forma idêntica à radiação.

A figura 51 ilustra a sombra provocada pelo Departamento de Engenharia Mecânica sobre as células de teste ao final do dia. A sombra às 18h incide por completo na célula de teste número 3 e só 20 minutos depois é que abrange toda a célula de teste número 2. As três células de teste só às 18h40m se encontram todas em sombra.

As dimensões destes edifícios protegem as células de teste dos ventos, exceptuando os ventos com direcção de SW e NE.



Figura 49: Posicionamento do sol ao longo do dia em relação às células de teste.

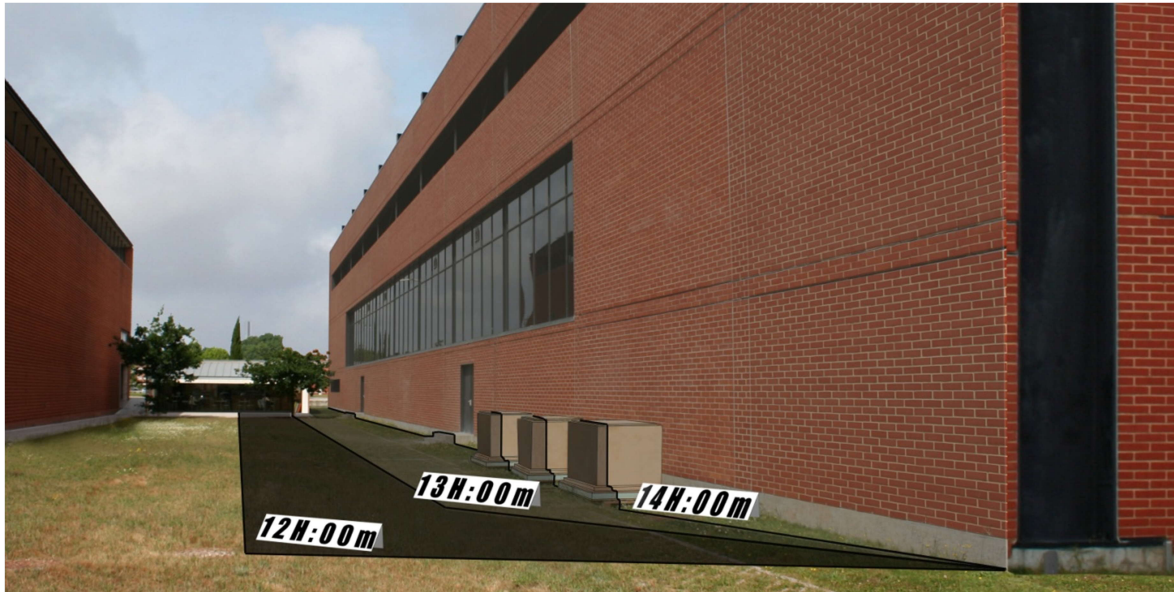


Figura 50: Sombra do Departamento de Engenharia Civil sobre as células de teste.



Figura 51: Sombra do Departamento de Engenharia Mecânica sobre as células de teste.

Outra condicionante do ensaio prende-se pelo facto das três células de teste não serem ventiladas, revelando ser uma limitação numa questão de representatividade de uma pequena casa de adobe, mas desta forma com este trabalho servem-se dois grandes propósitos, a avaliação da questão da inércia térmica deste tipo de construções e o cálculo da condutibilidade térmica (λ) do material terra.

Na realização deste ensaio foi tido em conta que o material humedecido apresenta uma condutibilidade térmica, λ , completamente distinta da do material seco, por isso as células de teste nos dias que se

demonstraram chuvosos estiveram devidamente resguardadas e os valores registados nesses dias não foram tidos em conta na análise efectuada.

5.3.2. Análise climatérica do mês de Maio

O mês de Maio de 2010 em Portugal Continental apresentou valores baixos de precipitação e um período quente entre os dias 20 e 23, nos quais ocorreu uma onda de calor em muitos locais do litoral.

5.3.2.1. Temperatura

No mês de Maio ocorreram temperaturas máximas superiores ou iguais a 25°C em algumas localidades e a 32°C em outras, verificando valores superiores aos valores médios registados entre 1971-2000. Os valores registados das temperaturas médias e mínimas foram próximos dos valores médios registados entre 1971-2000. Na figura 52 estão representadas as distribuições espaciais da temperatura mínima, média e máxima do ar do mês de Maio de 2010, e na figura 53 as respectivos desvios em relação à média de 1971-2000 [14].

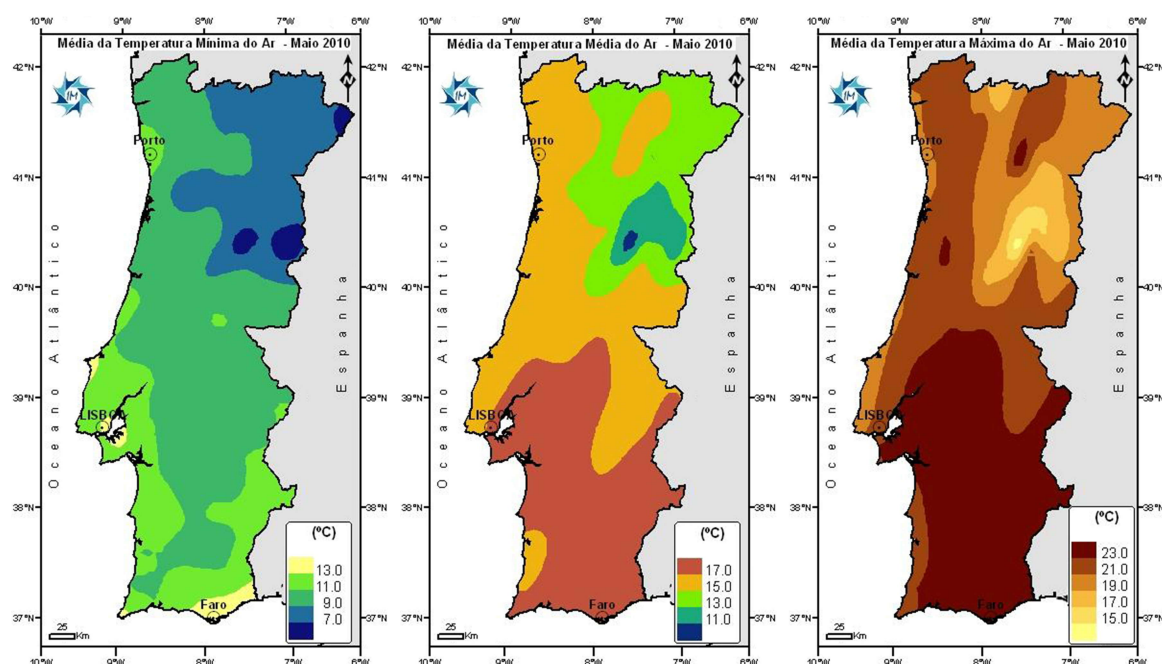


Figura 52: Distribuição espacial das temperaturas mínima, média e máxima em Maio de 2010 [14].

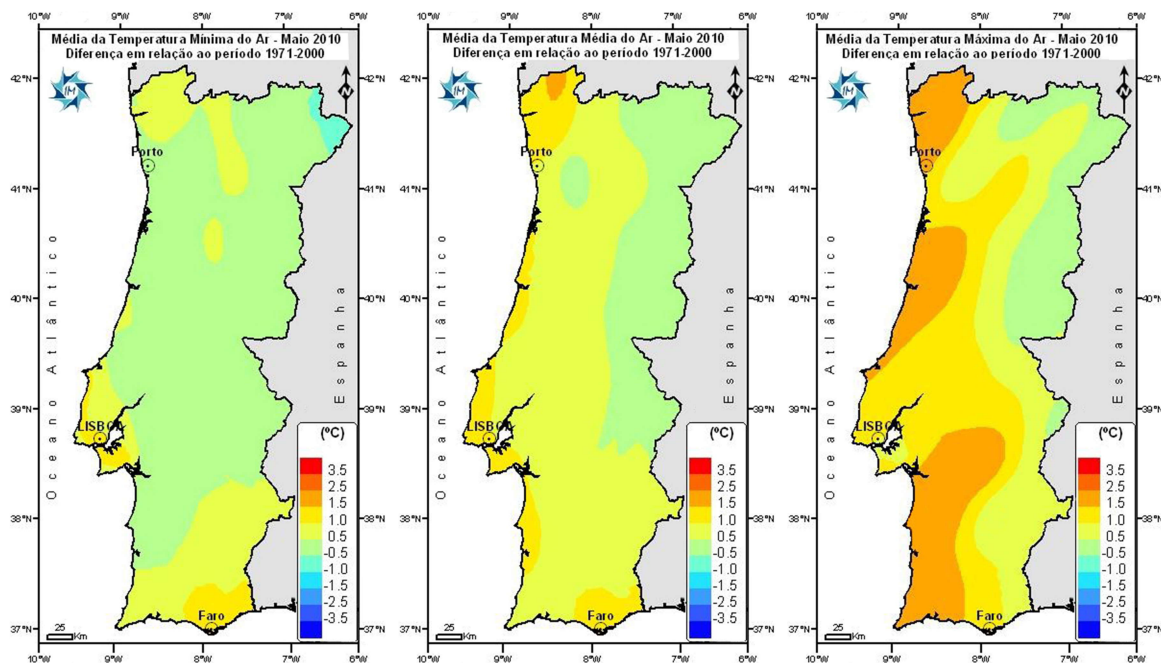


Figura 53: Desvios em relação à média de 1971-2000 das temperaturas mínima, média e máxima em Maio de 2010 [14].

As temperaturas registadas no mês de Maio em Aveiro apresentaram frequentes oscilações, registando-se as temperaturas mais elevadas nos dias 21 e 22 na ordem dos 35°C e as temperaturas mais baixas nos dias 4 e 5 atingindo o valor de 7,5°C. A figura 54 descreve o perfil de temperaturas ao longo do mês de Maio [50; 51].

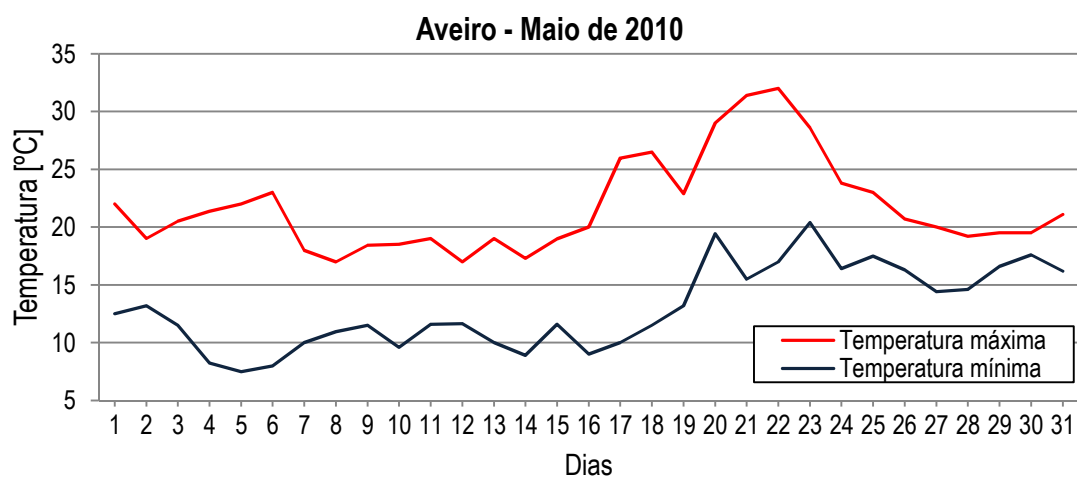


Figura 54: Temperaturas máximas e mínimas registadas no mês de Maio em Aveiro [50; 51].

5.3.2.2. Precipitação

A quantidade de precipitação relativa ao mês de Maio foi inferior numa percentagem de 75% relativamente ao valor médio registado entre 1971-2000, como ilustra a figura 55, classificando-se como um mês seco ao normal em todo o território do Continente [14].

O estado do tempo relativamente á cidade de Aveiro registou uma alternância entre períodos de céu pouco nublado ou limpo e períodos de maior nebulosidade. Ocorreram aguaceiros entre os dias 7 e 9 e nos dias 26 e 27, em particular no dia 8, os aguaceiros foram fortes e acompanhados de trovoadas.

O vento apresentou características inconstantes sendo por vezes fraco a moderado e por vezes de forte frequência, soprando de todos os rumos ao longo de todo o mês [14].

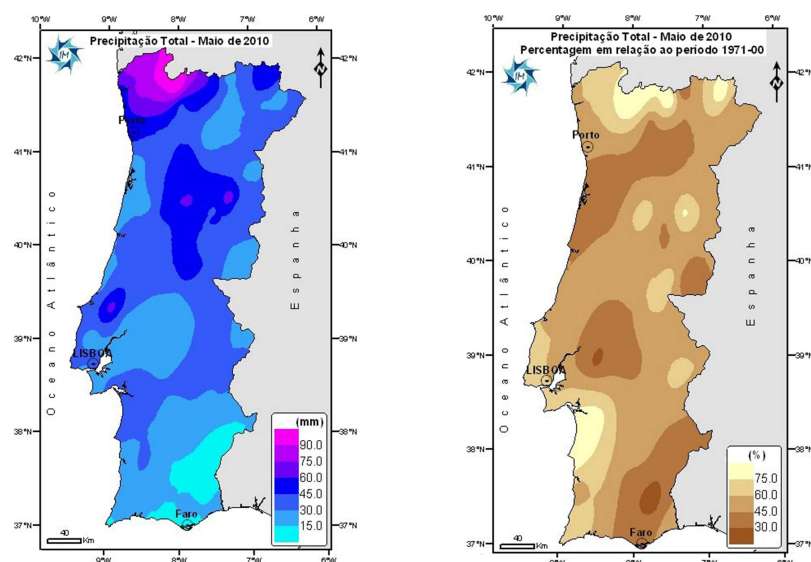


Figura 55: Precipitação total em Maio e respectiva percentagem em relação à média 1971-2000 [14].

5.3.2.3. Radiação

Os valores da radiação solar foram superiores aos valores normais registados entre 1971-2000 em todo o território Nacional, com os valores mais baixos a ocorrerem nas regiões montanhosas do Norte e Centro e os mais altos na região Sul, como ilustra a figura 56 [14]. A figura 57 ilustra os valores da radiação solar registada em Aveiro no mês de Maio [50; 51].

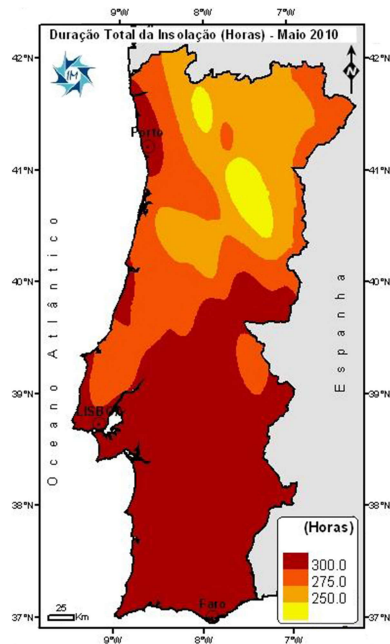


Figura 56: Insolação, Maio de 2010 [14].

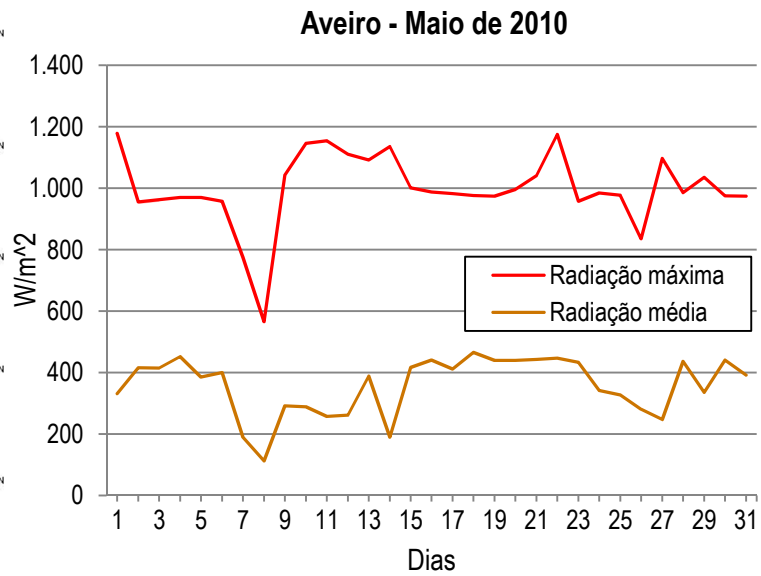


Figura 57: Insolação em Aveiro, Maio de 2010 [50; 51].

5.3.3. Análise e discussão dos resultados obtidos

As células de teste foram instrumentadas durante todo o mês de Maio e apresentam-se os resultados mais significativos e mais elucidativos para evidenciar o cálculo da condutibilidade térmica e da inércia térmica.

5.3.3.1. Dia 1 de Maio de 2010

Os resultados obtidos no primeiro dia de monitorização para as três células de teste são apresentados na tabela 8 e as curvas das temperaturas estão ilustradas nas figuras 58, 59 e 60.

Numa perspectiva de proceder a uma melhor compreensão e análise dos resultados obtidos, compilou-se na figura 61 todas as curvas das temperaturas das diferentes células de teste e os dados da humidade relativa referente a este dia de ensaio.

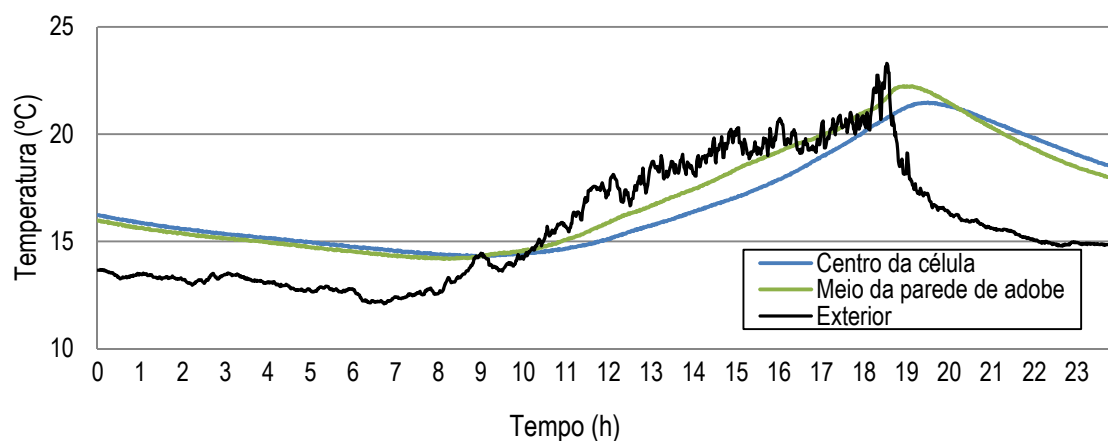


Figura 58: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 1 de Maio de 2010.

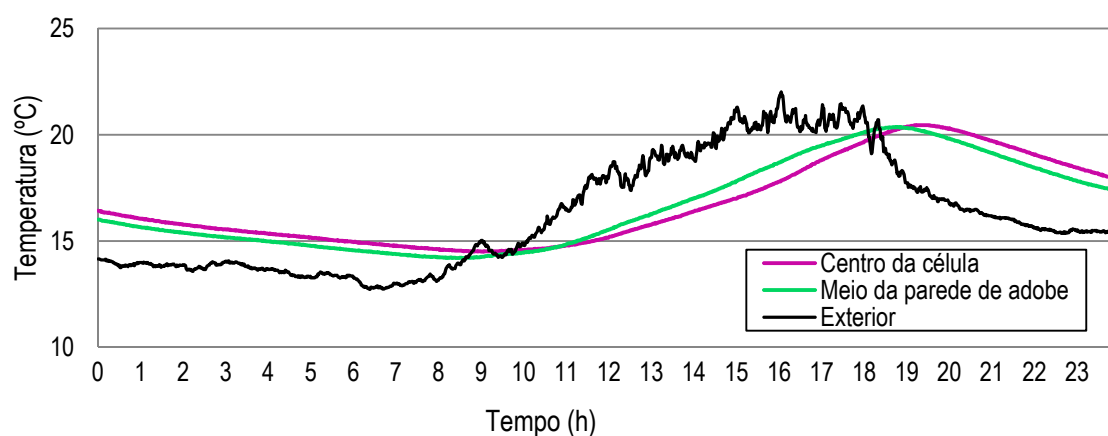


Figura 59: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 1 de Maio de 2010.

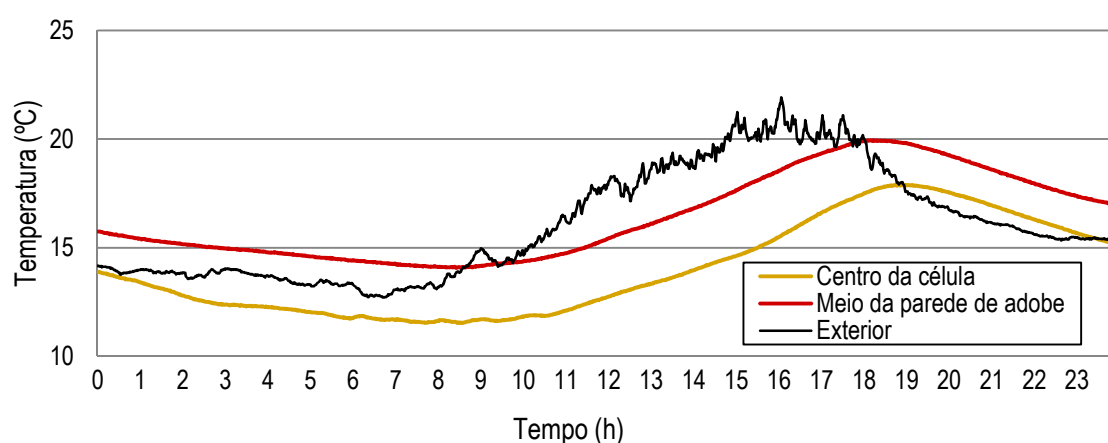


Figura 60: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 1 de Maio de 2010.

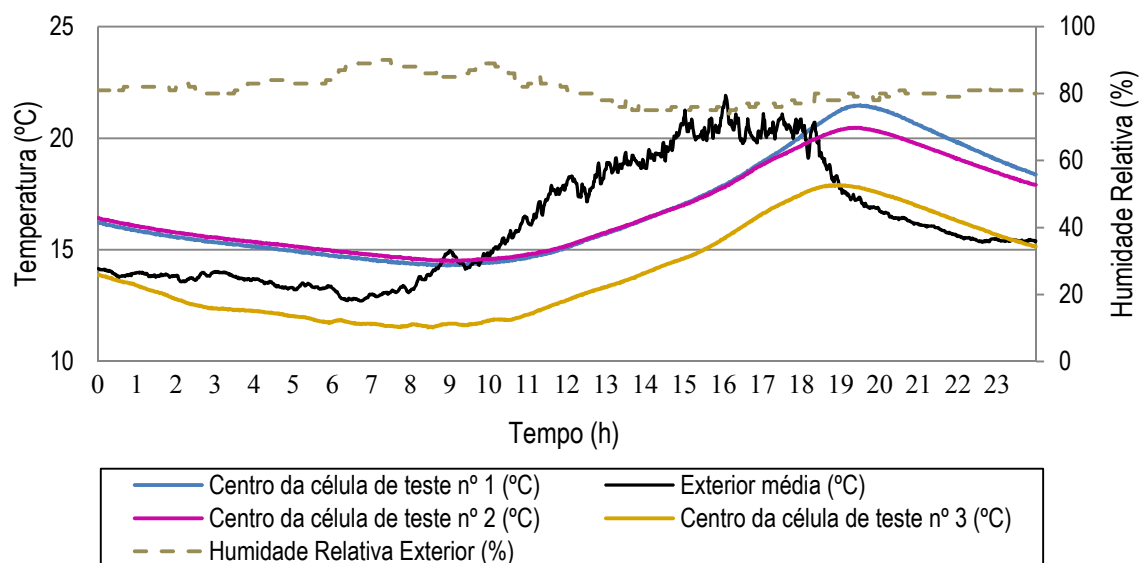


Figura 61: Temperaturas das três células de teste no dia 1 de Maio de 2010.

Para se realizar uma análise mais exacta neste trabalho foram usados dados climáticos da estação de meteorologia do Departamento de Ambiente da Universidade de Aveiro [51] e da estação meteorologia da Protecção Civil do Município de Aveiro [50].

Na tabela 7 é apresentada a informação dos dados meteorológicos relativos ao dia 1 de Maio para a cidade de Aveiro [50; 51], que se mostrou um dia nublado, com temperaturas máximas de 22 °C e temperaturas mínimas de 12,5°C, com humidade relativa de valor médio percentual de 81%.

Tabela 7: Dados meteorológicos do dia 1 de Maio para Aveiro [50; 51].




		Temperatura (°C)		Vento		Humidade Relativa (%)	
				Intensidade (m/s)	Hora de Registo		Hora de Registo
Média	15,4		WNW	4,1	-	81	-
Máxima	22		NNW	6,7	20h:00m	90	7h:20m
Mínima	12,5		-	0	1h:40m	74	16h:10m

Tabela 8: Resultados do ensaio do dia 1 de Maio.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	21,92	16h:03m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	21,48	19h:30m	0,44	3h:27m
Centro da célula de teste nº 2	20,46	19h:14m	1,46	3h:11m
Centro da célula de teste nº 3	17,90	18h:57m	4,02	2h:54m

Neste primeiro dia de ensaio verificou-se uma grande diferença nas temperaturas interiores das células de teste. Um dos motivos plausíveis para este acontecimento está directamente relacionado com o facto de ser o primeiro dia de ensaio e estas ainda não terem estado sujeitas aos ciclos diários, uma vez que até ao início do ensaio as células de teste se encontraram protegidas dentro do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro com temperaturas amenas.

A curva da temperatura exterior não apresenta um delineamento suave porque os dados são referentes a medições de minuto a minuto, sendo que maiores variações registadas são devidas a nebulosidade passageira ou a uma maior velocidade do vento.

Neste dia com alguma nebulosidade as células de teste números 1 e 2 registaram comportamentos semelhantes, ambas apresentaram um risco de sobreaquecimento devido ao facto de não serem ventiladas, gerando efeito estufa, que só com o acentuar do arrefecimento nocturno provocou a redução de temperaturas nas paredes e no interior das células de teste.

Relativamente à célula de teste número 3, esta teve um amortecimento na ordem dos 4,02°C, provando que a incorporação de cortiça nos adobes é muito favorável para o comportamento térmico.

5.3.3.2. Dia 5 de Maio de 2010

Seguidamente são apresentadas nas figuras 62, 63 e 64 as curvas das temperaturas das diferentes células de teste registadas após estas terem sido sujeitas a quatro ciclos diários.

O comportamento das curvas de temperatura das três células de teste neste dia 5 de Maio torna-se mais elucidativo quando comparadas entre si, como ilustra a figura 65 que também disponibiliza a informação da humidade relativa referente a este dia.

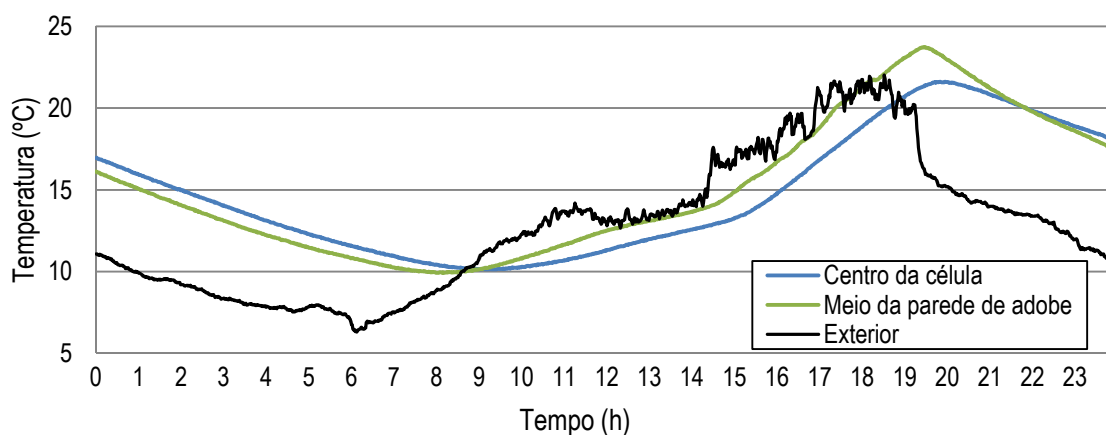


Figura 62: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 5 de Maio de 2010.

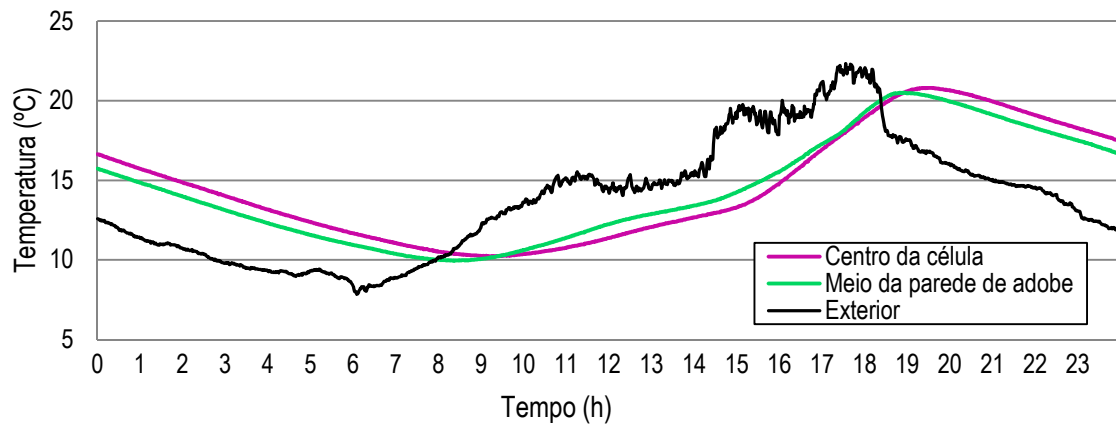


Figura 63: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 5 de Maio de 2010.

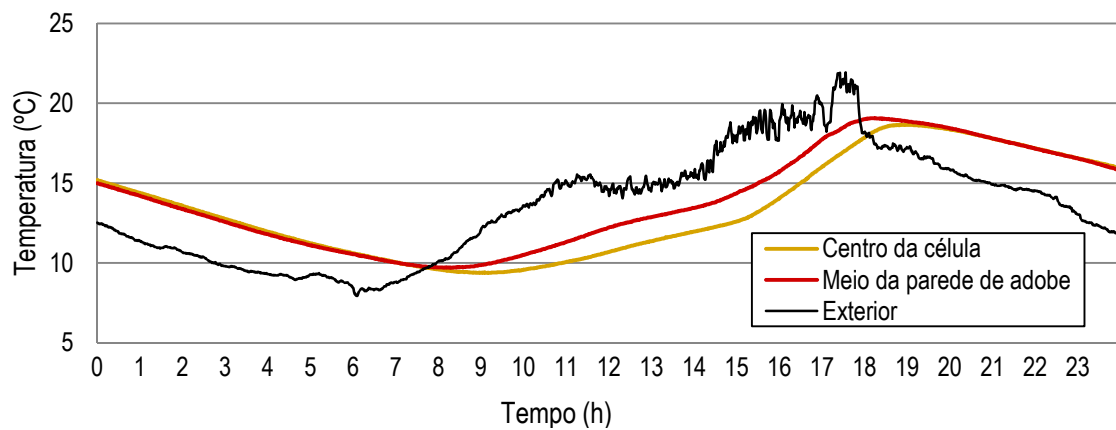


Figura 64: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 5 de Maio de 2010.

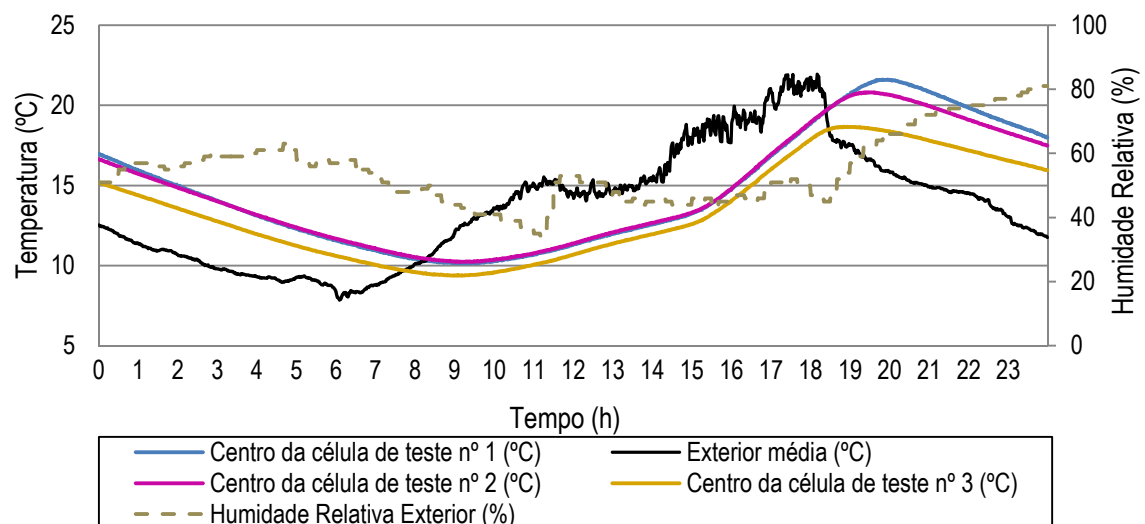


Figura 65: Temperaturas das três células de teste no dia 5 de Maio de 2010.

Este dia de ensaio caracterizou-se por um dia de sol, com temperaturas máximas de 22°C e temperaturas mínimas de 7,5°C, sem vento a incidir nas células de teste e com uma humidade relativa média percentual de 55%, como ilustra a tabela 9 que apresenta os dados meteorológicos do dia 5 de Maio para a cidade de Aveiro [50; 51].

Para o dia 5 de Maio os resultados provenientes da monitorização são apresentados na tabela 10.

Tabela 9: Dados meteorológicos do dia 5 de Maio para Aveiro [50; 51].




				Vento		Humidade Relativa (%)	
	Temperatura (°C)			Intensidade (m/s)	Hora de Registo		Hora de Registo
Média	16,1		NNW	2,5	-	55	-
Máxima	22		WNW	5,4	12h:50m	81	11h:10m
Mínima	7,5		-	0	6h:10m	34	23h:50m

Tabela 10: Resultados do ensaio do dia 5 de Maio.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	21,95	18h:10m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	21,61	19h:56m	0,34	1h:46m
Centro da célula de teste nº 2	20,81	19h:24m	1,14	1h:14m
Centro da célula de teste nº 3	18,66	18h:50m	3,29	0h:40m

O quinto dia de ensaio foi um dia de céu limpo e solarengo. O facto de ser um dia de sol proporcionou uma melhor visibilidade da presença dos elementos perturbadores correspondentes à geometria dos edifícios da envolvente que só permitiam que as células de teste estivessem sujeitas a exposição da radiação directa entre as 14h e as 18h40m, uma vez que todas as curvas das temperaturas apresentam uma mudança de declive quando são sujeitas à exposição solar.

Quando deixa de haver exposição solar entre as 18h e as 19h torna-se visível nas curvas das temperaturas exteriores das três células de teste um decréscimo acentuado devido à ausência de incidência do sol.

As células de teste números 1 e 2, apresentaram comportamentos idênticos, sendo que na primeira estes se mostram mais vincados devido a esta ter mais 20 minutos de exposição solar do que a célula de teste número 2. Em ambas foi notório o risco de um sobreaquecimento para o qual contribuiu o efeito estufa gerado no interior das células de teste devido à falta de ventilação interior.

Neste dia de grande amplitude térmica com temperaturas máximas de 22°C, a célula de teste número 3 não apresentou sobreaquecimento, realizando ainda um bom amortecimento na ordem dos 3,29°C.

5.3.3.3. Dia 10 de Maio de 2010

Os resultados das temperaturas registadas no ensaio no dia 10 de Maio para as diferentes células de teste são apresentados na tabela 12 e expostas graficamente nas figuras 66, 67 e 68.

A figura 69 ilustra as curvas das temperaturas das três células de teste com a informação adicional da humidade relativa alusiva ao dia 10 de Maio, com o intuito de se proceder a uma melhor análise comparativa.

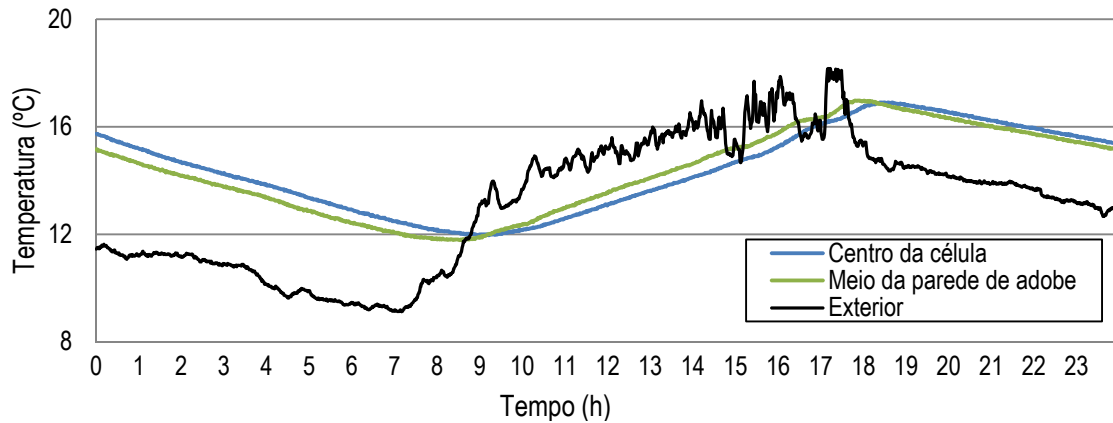


Figura 66: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 10 de Maio de 2010.

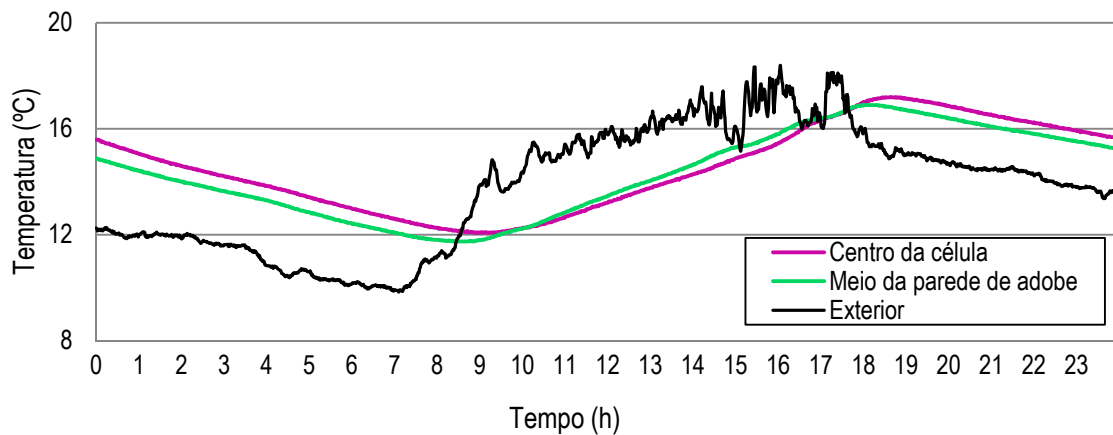


Figura 67: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 10 de Maio de 2010.

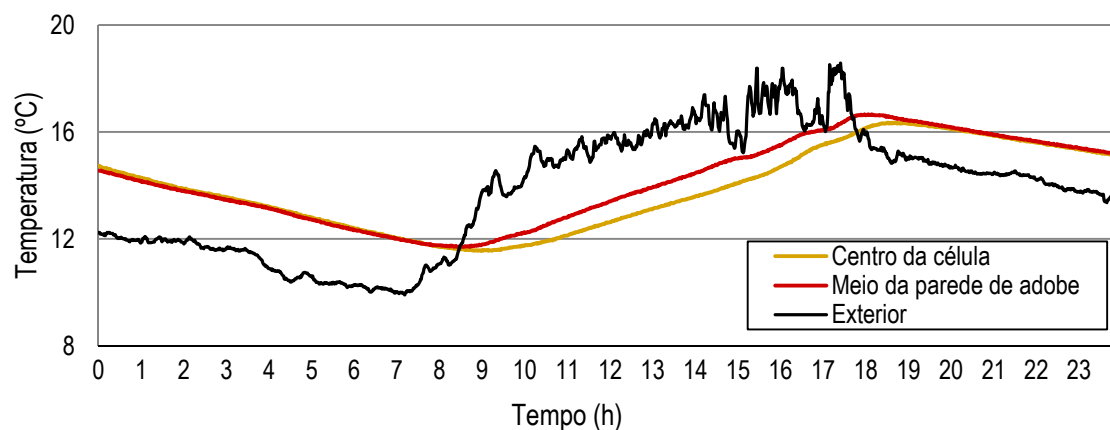


Figura 68: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 10 de Maio de 2010.

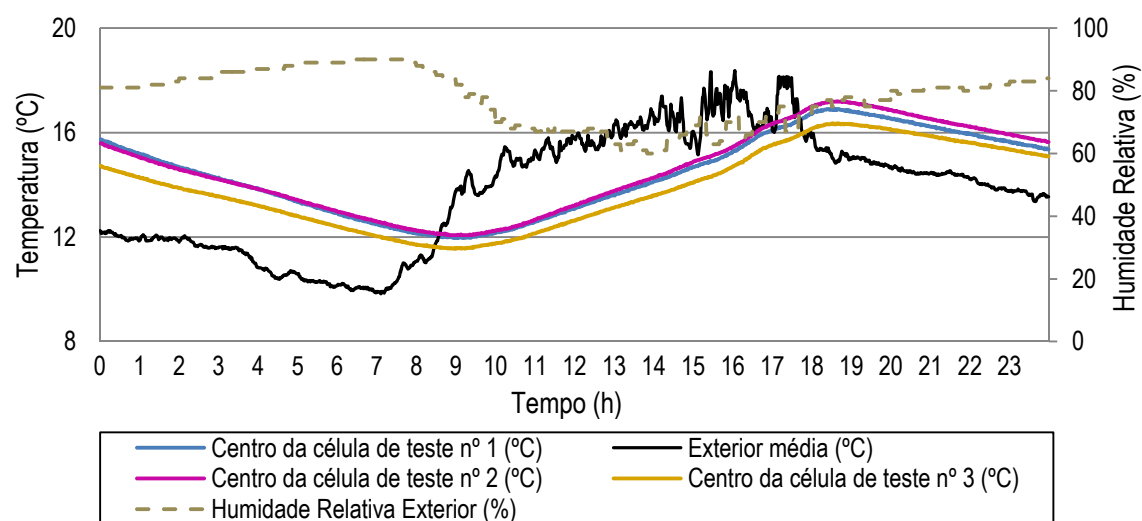


Figura 69: Temperaturas das três células de teste no dia 10 de Maio de 2010.

O dia 10 de Maio foi um dia nublado, com temperaturas máximas na ordem dos 18,5°C e temperaturas mínimas de 9,6°C, com ventos moderados na direcção das células de teste, com humidade relativa média percentual de 78%, como ilustra a tabela 11 [50; 51].

Tabela 11: Dados meteorológicos do dia 10 de Maio para Aveiro [50; 51].




	Temperatura (°C)		Vento		Humidade Relativa (%)		
			Intensidade (m/s)	Hora de Registo		Hora de Registo	
Média	17,3		WSW	4,4	-	78	-
Máxima	18,5		WSW	6,7	16h:30m	90	6h:30m
Mínima	9,6		-	0	23h:40m	60	13h:50m

Tabela 12: Resultados do ensaio do dia 10 de Maio.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	18,37	16h:03m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	16,91	18h:34m	1,46	2h:31m
Centro da célula de teste nº 2	17,20	18h:45m	1,17	2h:42m
Centro da célula de teste nº 3	16,35	18h:32m	2,02	2h:29m

No dia 10, as três células de teste têm um comportamento muito parecido entre elas, muito devido à predominância de alguma nebulosidade e à presença de ventos em direcção favorável que provocaram uma maior convecção exterior favorecendo a dissipação de energia das paredes, por estes motivos não se verificaram sobreaquecimento das células de teste.

Após 9 ciclos diários às quais estiveram sujeitas as três células de teste, a curva da temperatura interior da célula de teste número 3 apresentou sempre a maior diferença quando comparada com as outras curvas das temperaturas interiores das outras células de teste. Esta diferença deve-se à incorporação de cortiça na composição do adobe que melhorou o isolamento térmico, provando que é uma solução viável para este tipo de construções.

5.3.3.4. Dia 13 de Maio de 2010

Para o dia 13 de Maio são ilustradas nas figuras 70, 71 e 72 as curvas das temperaturas correspondentes às três células de teste para este dia de ensaio, seguidas dos respectivos resultados expostos na tabela 14.

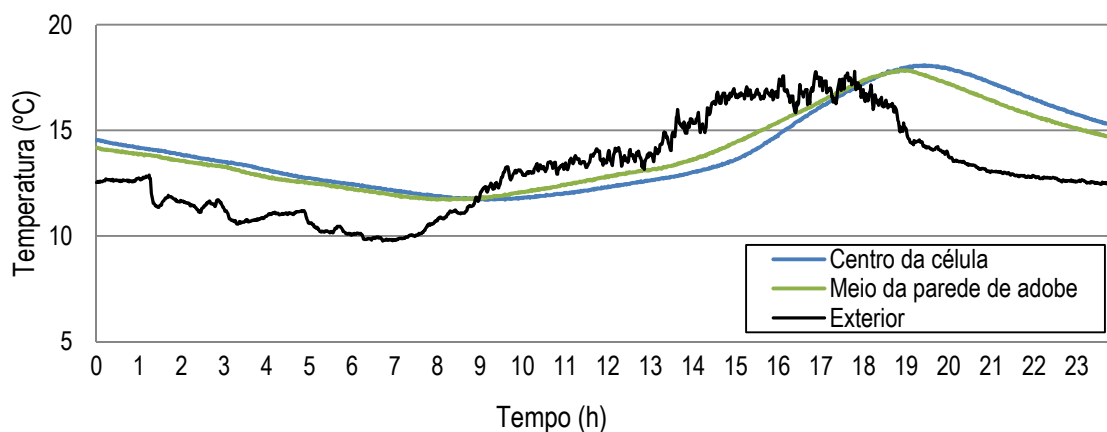


Figura 70: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 13 de Maio de 2010.

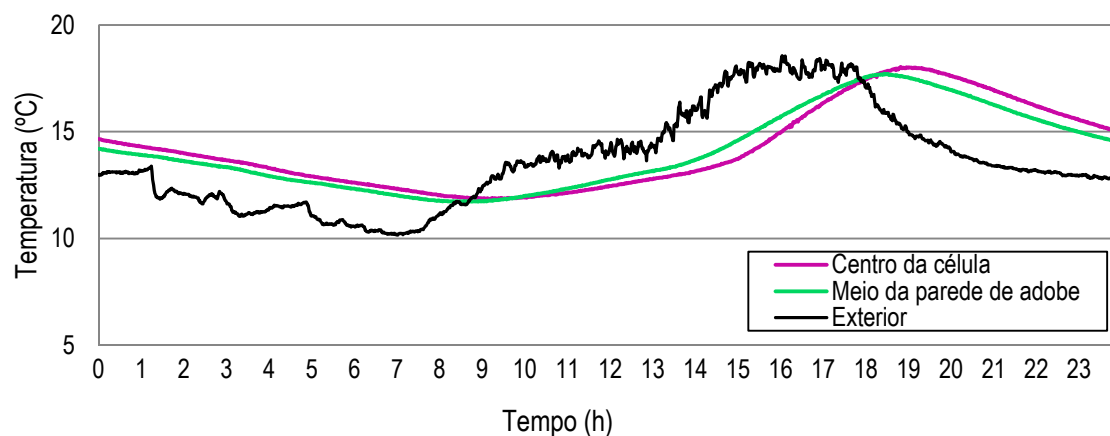


Figura 71: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 13 de Maio de 2010.

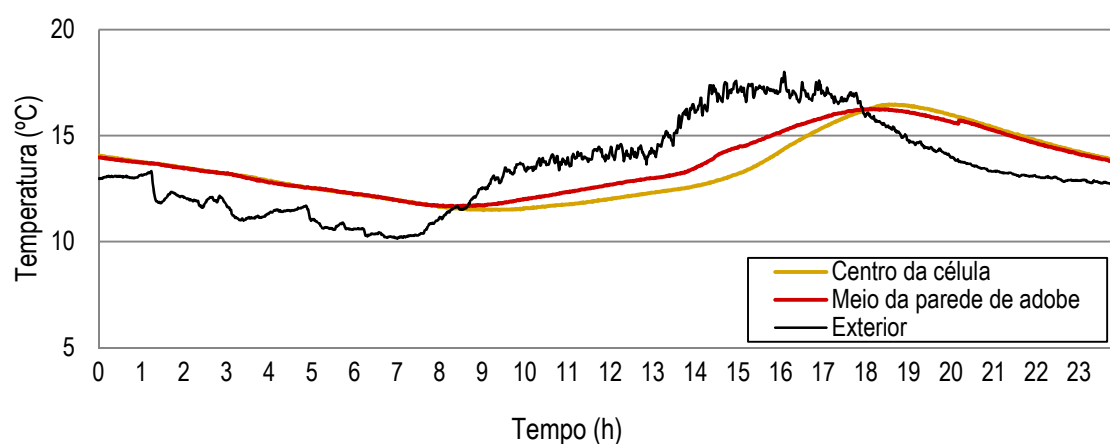


Figura 72: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 13 de Maio de 2010.

Na figura 73 são apresentadas todas as curvas das temperaturas referentes ao dia 13 de Maio para todas as células de teste.

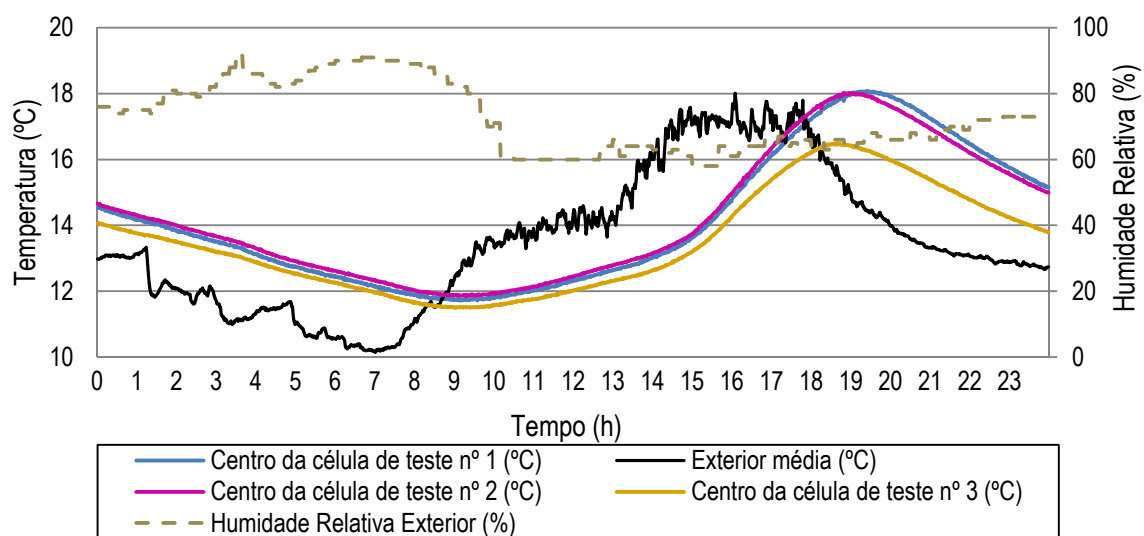


Figura 73: Temperaturas das três células de teste no dia 13 de Maio de 2010.

O dia 13 de Maio caracterizou-se por ser um dia de sol com céu limpo mas com baixa amplitude térmica, com temperaturas máximas de 19°C e mínimas de 10°C. Neste dia o vento não soprou numa direcção favorável ao contacto nas células de teste, como ilustra a tabela 13 [50; 51].

Tabela 13: Dados meteorológicos do dia 13 de Maio [50; 51].




		Temperatura (°C)		Vento		Humidade Relativa (%)	
					Intensidade (m/s)	Hora de Registo	 Hora de Registo
Média	17,3		NNW	4,4	-	73	-
Máxima	19		NNW	9,8	18h:50m	92	3h:30m
Mínima	10		-	0	2h:30m	58	15h:00m

Tabela 14: Resultados do ensaio do dia 13 de Maio.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	18,01	16h:05m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	18,08	19h:26m	-0,07	3h:21m
Centro da célula de teste nº 2	18,03	18h:49m	-0,02	3h:44m
Centro da célula de teste nº 3	16,48	18h:41m	1,53	3h:36m

Neste dia 13, as células de teste números 1 e 2 revelaram um sobreaquecimento devido à combinação de várias situações propícias a este efeito, a elevada exposição solar, a inexistência de ventos na sua direcção, que não proporcionou convecção exterior favorável das paredes conduzindo ao aquecimento do espaço interior, uma vez que não é ventilado (efeito estufa) o que explica o facto dos resultados das temperaturas máximas interiores serem quase tão elevadas como as temperaturas máximas registadas no exterior.

A célula de teste número 3 uma vez que é isolada apresentou comportamento distinto das outras células de teste, reforçando mais uma vez que o comportamento térmico é melhorado com a incorporação de cortiça no adobe.

Dos resultados já analisados permite concluir que nos dias de baixa amplitude térmica são mais tímidos os amortecimentos registados nas células de teste.

5.3.3.5. Dia 21 de Maio de 2010

São apresentadas na tabela 16 os resultados das temperaturas do ensaio realizado no dia 21 de Maio para as três células de teste, e as referentes curvas das temperaturas estão ilustradas nas figuras 74, 75 e 76.

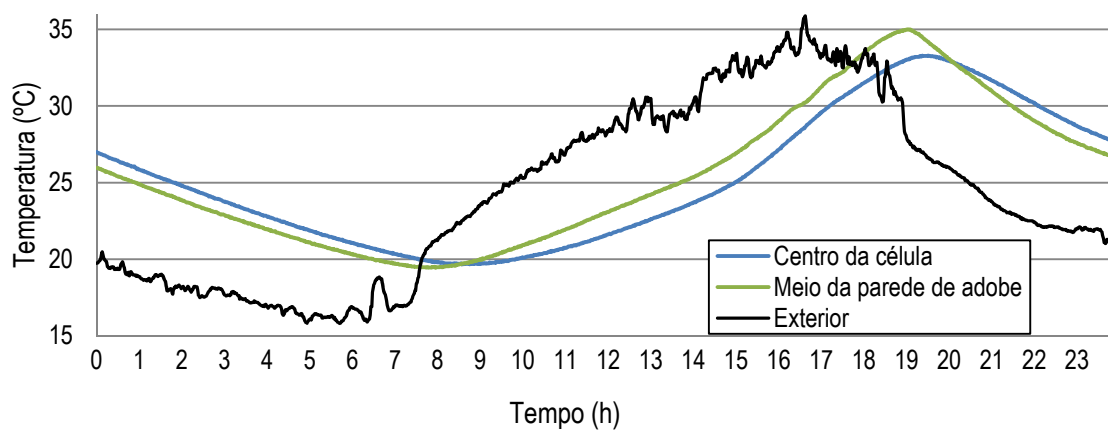


Figura 74: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 21 de Maio de 2010.

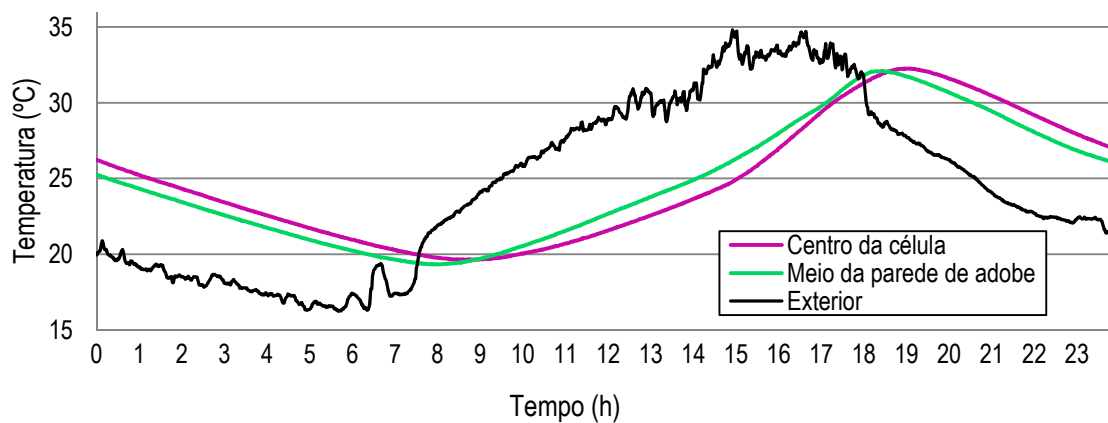


Figura 75: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 21 de Maio de 2010.

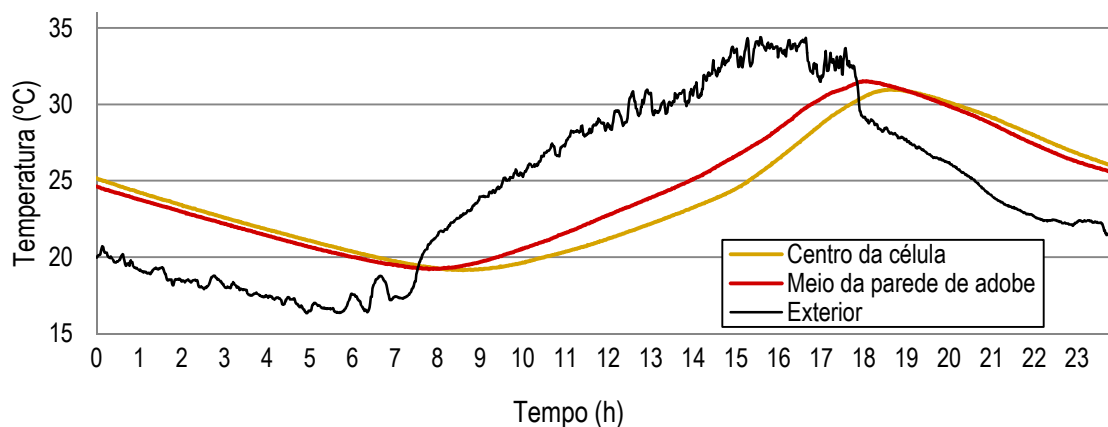


Figura 76: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 21 de Maio de 2010.

A figura 77 apresenta todas as curvas das temperaturas interiores das três células de teste relativas ao dia 21 de Maio e a informação da humidade relativa registada neste dia de ensaio.

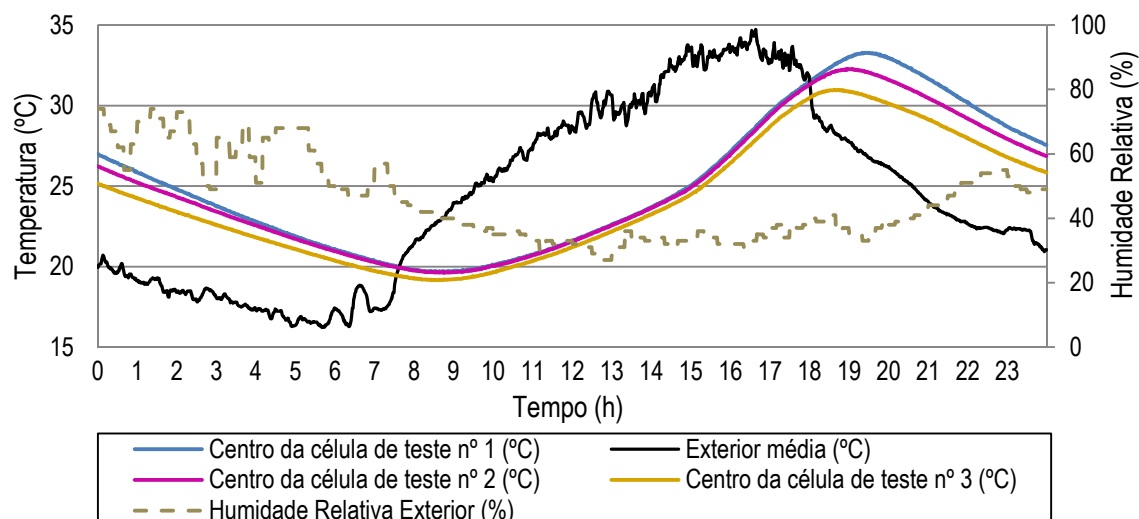


Figura 77: Temperaturas das três células de teste no dia 21 de Maio de 2010.

O dia 21 de Maio definiu-se como um dia de sol com 12,8 horas de céu limpo, registando as temperaturas máximas mais altas de todo o mês de Maio, sem ventos na direcção das células de teste, como ilustra a tabela 15 [50; 51].

Tabela 15: Dados meteorológicos do dia 21 de Maio [50; 51].

	Temperatura (°C)		Vento		Humidade Relativa (%)		
				Intensidade (m/s)	Hora de Registo		Hora de Registo
Média	25,8		N	2,1	-	46	-
Máxima	35		NNW	5,8	17h:30m	74	1h:20m
Mínima	16		-	0	5h:20m	27	12h:50m

Tabela 16: Resultados do ensaio do dia 21 de Maio.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	34,72	16h:38m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	33,28	19h:22m	1,44	3h:16m
Centro da célula de teste nº 2	32,26	18h:55m	2,46	2h:17m
Centro da célula de teste nº 3	30,97	18h:43m	3,75	2h:05m

A célula de teste número 1, neste dia de ensaio após 4 horas e 40 minutos de grande exposição solar, apresentou um risco de sobreaquecimento devido não só à carência de vento na direcção das células de

teste, que não proporcionou convecção exterior nas paredes, mas também à inexistência de ventilação no espaço interior que gerou o efeito estufa.

A célula de teste número 2 apresentou um comportamento semelhante ao da célula de teste número 1, registrando também uma tendência de sobreaquecimento do espaço interior pelas mesmas razões acima descritas. A razão para a qual não apresentou picos tão elevados está directamente relacionado com o facto de ter menos 20 minutos de exposição solar em relação à primeira.

No dia mais quente e com a maior amplitude térmica do mês de Maio registaram-se bons amortecimentos nas três células de teste, quando comparados com os outros dias de ensaio, o que leva a concluir que a maior amplitude térmica aumenta o potencial de amortecimento térmico das células de teste.

5.3.3.5. Dia 22 de Maio de 2010

Os resultados das temperaturas obtidas no ensaio do dia 22 de Maio para as três células de teste são apresentados na tabela 18 e ilustrados graficamente nas figuras 78, 79 e 80.

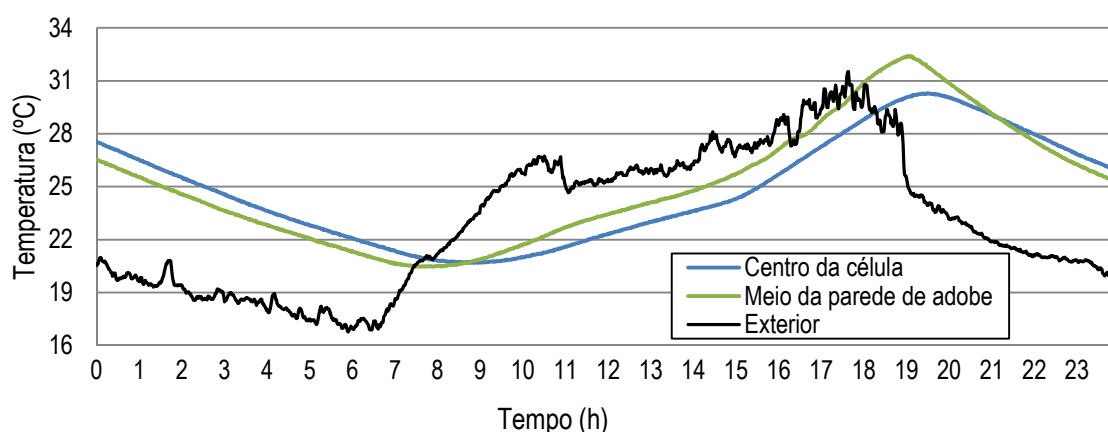


Figura 78: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 22 de Maio de 2010.

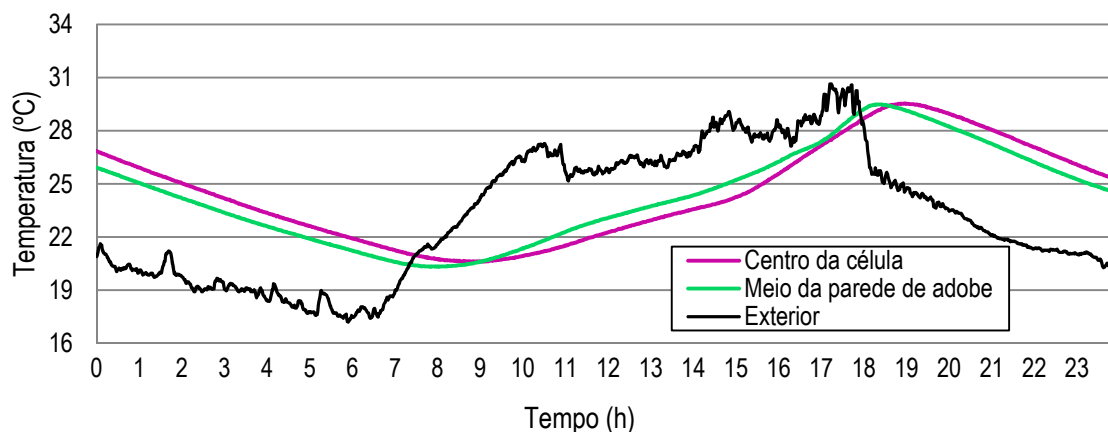


Figura 79: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 22 de Maio de 2010.

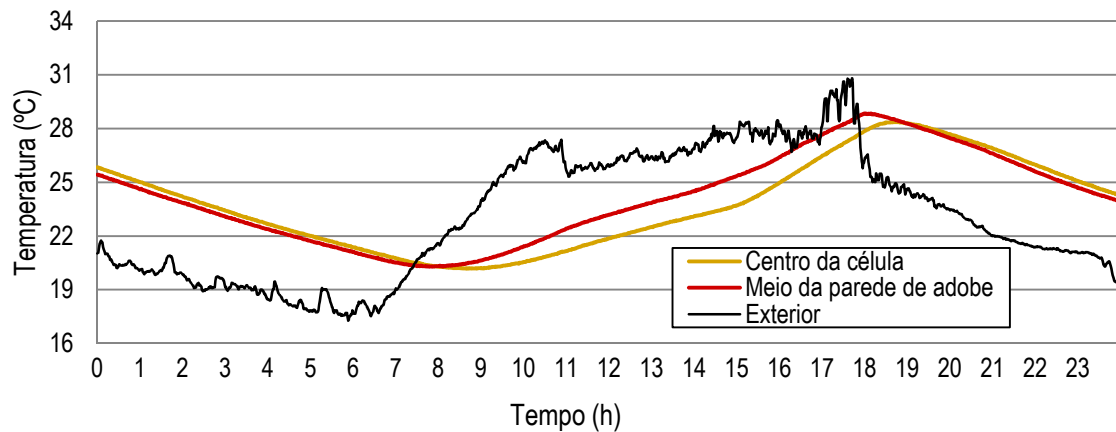


Figura 80: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 22 de Maio de 2010.

A figura 81 ilustra as curvas das temperaturas interiores das três células de teste com o intuito de facilitar a análise comparativa dos comportamentos das temperaturas das três células de teste.

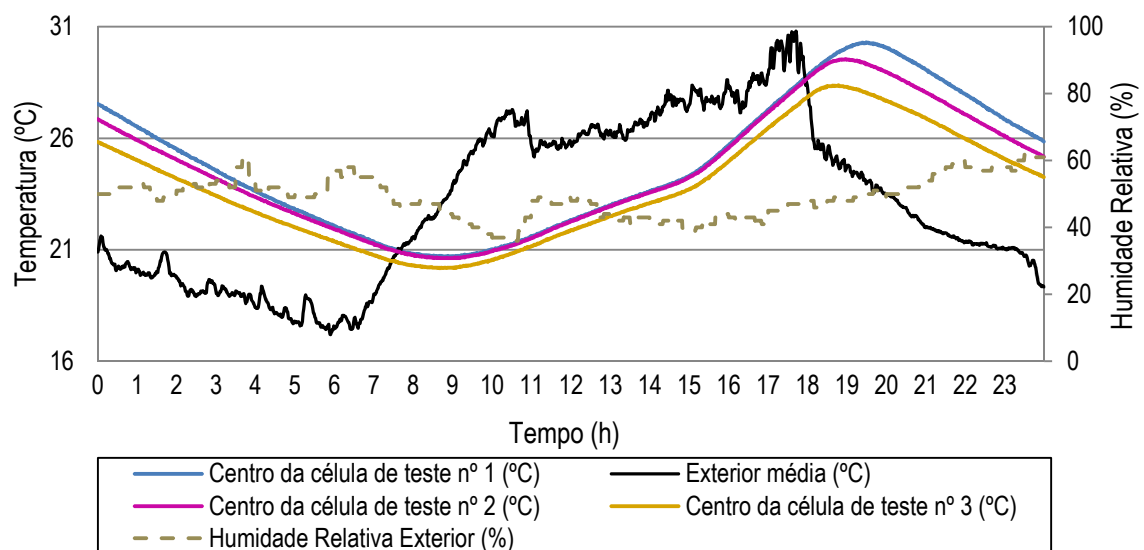


Figura 81: Temperaturas das três células de teste no dia 22 de Maio de 2010.

O dia 22 de Maio foi um dia de sol com 12,7 horas de céu limpo, registrando temperaturas máximas de 32°C e temperaturas mínimas de 17 °C, apresentando ventos fracos sem a direcção das células de teste. Foi um dia com uma humidade relativa baixa, como ilustra a tabela 17 [50; 51]. Os resultados referentes ao dia 22 de Maio são apresentados na tabela 18.

Tabela 17: Dados meteorológicos do dia 22 de Maio [50; 51].




	Temperatura (°C)		Vento		Humidade Relativa (%)	
				Intensidade (m/s)	Hora de Registo	 Hora de Registo
Média	28,3		N	1,7	-	49
Máxima	32		WSW	5,8	13h:00m	62
Mínima	17		-	0	0h:10m	36

Tabela 18: Resultados do ensaio do dia 22 de Maio.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	30,80	17h:42m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	30,30	19h:29m	0,50	2h:13m
Centro da célula de teste nº 2	29,54	18h:57m	1,26	1h:15m
Centro da célula de teste nº 3	28,37	18h:47m	2,43	1h:05m

As três células teste neste dia de ensaio apresentam mais uma vez comportamentos idênticos aos que haviam sido registados no dia 21 de Maio.

A grande diferença prende-se nos valores dos amortecimentos obtidos, uma vez que neste dia de ensaio registou-se uma redução da amplitude térmica que diminuiu o potencial de amortecimento térmico das três células de teste.

5.3.4. Determinação da condutibilidade térmica das diferentes células de teste

Para o cálculo do coeficiente de condutibilidade térmica, λ , usou-se a fórmula clássica da equação de fluxo unidireccional em regime permanente, onde é considerada a resistência térmica superficial interior, $R_{si}=0,13$ como adoptado no RCCTE.

$$\lambda = e \times \left(\frac{1}{R_{si}} \right) \times \frac{(\theta_{int} - \theta_{si})}{(\theta_{si} - \theta_{parede})} \quad (eq.6)$$

Em que:

R_{si} – Resistência térmica superficial interior (m².°C/W);

e – Espessura do elemento (m);

θ_{int} – Temperatura interior (°C);

θ_{si} – Temperatura superfície interior (°C);

θ_{parede} – Temperatura no interior da parede (°C).

O cálculo desta propriedade termofísica e do coeficiente de transmissão térmica, U , das diferentes células de teste foi realizado no sentido transversal do fluxo de calor em relação à parede, os resultados são apresentados na tabela 19.

Tabela 19: Resultados para as diferentes células de teste da condutibilidade térmica λ e do coeficiente de transmissão térmica U .

Célula de teste nº 1		Célula de teste nº 2		Célula de teste nº 3	
U [W/m ² .°C]	λ [W/m.°C]	U [W/m ² .°C]	λ [W/m.°C]	U [W/m ² .°C]	λ [W/m.°C]
2,06	0,95	1,83	0,80	1,47	0,59

A célula de teste número 3 apresenta um valor do coeficiente de condutibilidade térmica U (W/m².°C) inferior ao valor máximo admissível para elementos opacos estabelecido no RCCTE [3].

Seguindo a norma DIN EN ISO 6946 [52], para o cálculo do valor do coeficiente de transmissão térmica, U , usando as equações de fluxo, e considerando $R_{si} = 0,13$.

$$U = \frac{1}{R_{si}} \times \frac{(\theta_{int} - \theta_{si})}{(\theta_{int} - \theta_{ext})} \quad (eq. 7)$$

em que:

R_{si} – Resistência térmica superficial interior (m².°C/W);

θ_{int} – Temperatura interior (°C);

θ_{si} – Temperatura superfície interior (°C);

θ_{ext} – Temperatura exterior (°C).

Na tabela 20 são apresentados os resultados para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U , e da condutibilidade térmica, λ , para as três células de teste.

Tabela 20: Resultados para as diferentes células de teste do coeficiente de transmissão térmica U e do coeficiente de condutibilidade térmica λ .

Célula de teste nº 1		Célula de teste nº 2		Célula de teste nº 3	
U [W/m ² .°C]	λ [W/m.°C]	U [W/m ² .°C]	λ [W/m.°C]	U [W/m ² .°C]	λ [W/m.°C]
2,22	1,07	1,95	0,87	1,65	0,69

A norma DIN V 4108-4:2007-06 [53], apresenta uma relação entre o peso específico da terra e a condutibilidade térmica, λ , à qual os resultados das três células de teste se enquadraram, como se ilustra a figura 82.

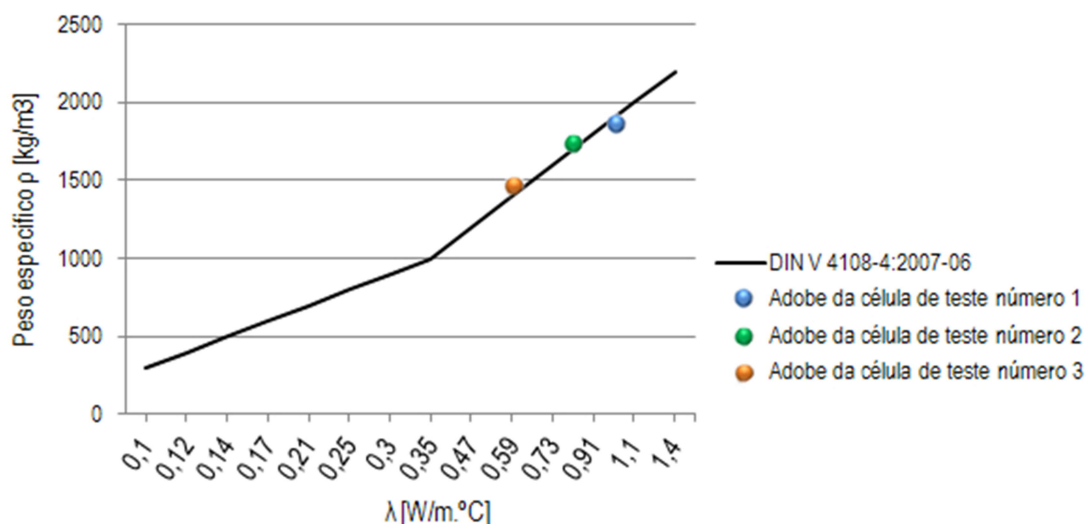


Figura 82: Relação entre o peso específico da terra e a condutibilidade térmica λ [53].

5.3.5. Comentário final

As células de teste números 1 e 2 apresentaram comportamentos semelhantes ao longo dos dias, evidenciando-se sempre mais um pouco a primeira célula, uma vez que detém um maior período de exposição solar quando comparada com as outras células de teste. Nos dias de grande radiação foi notório que ambas as células de teste apresentaram uma tendência de sobreaquecimento, isto acontece devido a uma acumulação de situações favoráveis a este efeito: i) a elevada exposição solar; ii) a inexistência de convecção exterior das paredes devido a carência de ventos na direcção das células de teste; iii) o efeito de estufa gerado devido a falta de ventilação do espaço interior das células de teste.

A célula de teste número 3 apresentou sempre um comportamento distinto das outras células de teste, evidenciando a importância que a incorporação de cortiça nos adobes teve no comportamento térmico.

Os dias 5, 21 e 22 de Maio mostraram-se dias de grande exposição solar, sem incidência de ventos na direcção das células de teste o que não favoreceu a convecção exterior. A grande diferença entre estes dias residuiu na amplitude térmica registada o que influenciou os resultados do amortecimento.

Em dias de grande amplitude térmica e elevada exposição solar, as células de teste demonstram bons níveis de amortecimento, já os dias que exibem alguma nebulosidade revelam-se prejudiciais para os amortecimentos.

Com esta tese cooperamos para o conhecimento mais aprofundado das construções em terra pensando ter dado um contributo importante para que este património secular perdure ao longo dos tempos.

CAPÍTULO 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

CAPITULO 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões principais

- 6.1.1. Construções em adobe
- 6.1.2. Comportamento térmico de edifícios
- 6.1.3. Instrumentação e resultados
 - 6.1.3.1. Inércia térmica
 - 6.1.3.2. Condutibilidade térmica
- 6.1.4. Perspectivas futuras

6.1. Conclusões principais

6.1.1. Construções em adobe

A construção em terra é uma solução interessante do ponto de vista ecológico. Sendo a terra um material económico, inesgotável, fácil de trabalhar e sobretudo sustentável, traduz para os edifícios o seu carácter reciclável, pois a terra volta a ser terra após o final de vida útil da construção. Além disso o consumo de energias não renováveis é mínimo e não contribui para a redução dos recursos de inertes nem para o desenquadramento paisagístico, uma vez que se enquadra perfeitamente na arquitectura moderna. É ainda um material com propriedades higrotérmicas e com um bom comportamento acústico, factores que contribuem para a necessidade de baixos consumos energéticos no objectivo de manter um ambiente de conforto.

Outra vantagem deste tipo de construção é o facto de serem necessários poucos recursos para a sua execução, traduzindo-se numa solução económica, comparativamente com outros métodos de construção.

É ainda um material não combustível permitindo o uso em paredes corta-fogo, escadas de emergência ou locais que necessitem de compartimentação de ambiente.

Contudo é uma técnica que carece ainda de investigação; mas a tendência é de retorno às técnicas ancestrais, numa busca pela sustentabilidade e ecologia.

É necessário proceder-se a uma normalização deste tipo de construção para promover uma utilização mais assídua, como já acontece noutros países. Caminhando no mesmo sentido poderemos ir de encontro a um novo movimento edificatório que providencia um grande respeito pelo património existente, pelos materiais locais, mas sobretudo pela sustentabilidade.

6.1.2. A térmica de edifícios

O regulamento português das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE) [3] está preparado para edifícios apelidados de construção corrente que por norma faz recurso de materiais de construção correntes. Neste regulamento estão estabelecidas exigências em termos de valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis (U) para a envolvente externa e interna. A construção em terra neste campo fomenta questões de adaptabilidade à compatibilização das exigências actuais.

É fundamental que a construção em terra evolua para regulamentos sustentáveis não só para a qualidade térmica destas construções respeitando as exigências regulamentares actuais, mas também para dar resposta às questões de segurança estrutural deste tipo de construções.

Desta forma é necessário desenvolver estudos e trabalhos de investigação mais aprofundados e paramétricos que permitam criar uma base de normalização para este tipo de construções.

6.1.3. Instrumentação e resultados

De seguida sintetizam-se mais uma vez algumas conclusões principais relativamente aos resultados da campanha de monitorização das células de teste.

6.1.3.1. Inércia térmica

Os resultados obtidos na avaliação da inércia térmica destas construções são exploratórios, uma vez que existem condicionantes e variáveis que as afectam e que devem ser estudados detalhadamente de modo a perceber a sua influência.

Estas condicionantes e variáveis já expostas no capítulo 5 estão relacionadas com falta das condições de ventilação interior das células de teste, com as questões do grau de convecção do exterior, com a exposição solar, com questões da capacidade de arrefecimento nocturno e em menor escala com a humidade relativa.

Na célula de teste construída à base de adobes com adição de cortiça o efeito do amortecimento foi significativo na ordem dos 2°C e 3°C, provando-se que a incorporação de cortiça nos adobes é muito favorável ao comportamento térmico.

6.1.3.2. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica do material terra com incorporação de cortiça torna-se uma solução vantajosa e concorrencial uma vez que consegue uma condutibilidade térmica na ordem de 0,59 W/m.°C. Assim, para uma parede de 30 cm de largura já respeitaria os valores mínimos estabelecidos pelo regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE) [3].

Os valores obtidos das pelas três células encontram-se coerentes com os valores estipulados pela norma DIN V 4108-4:2007-06 [53] que já contempla a terra como material de construção, onde apresenta uma relação entre o peso específico da terra e a condutibilidade térmica, λ .

6.1.4. Perspectivas futuras

A conclusão deste trabalho não representa o fim, mas o início de futuras pesquisas e cooperação na procura do conhecimento. Indicam-se de seguida as perspectivas futuras de trabalhos a realizar dentro desta temática do comportamento térmico das construções em terra:

- Realizar a mesma instrumentação e análise paramétrica para estas três células de teste para cada estação do ano, criando condições de ventilação interior para tornar o estudo mais representativo de uma pequena casa de adobe.
- Deslocar as células de teste para outra localização para que estas não tenham elementos perturbadores proporcionando uma maior exposição solar e ventilação exterior.
- Incorporar janelas, porta e um telhado de forma a permitir permeabilidade do ar, realizando assim um trabalho mais representativo.
- Estudar soluções de reforço térmico para as células de teste que não incorporam cortiça e privilegiar o uso de materiais naturais e compatíveis com as paredes em terra.

Referências bibliográficas

Referencias Bibliográficas

- [1] PACHECO TORGAL, F; JALALI, S. (2009): “Construção em Terra: o Passado, Presente e o Futuro” – Revista Profissional da construção. Arte & Construção, Edição nº.230 – Portugal, Outubro.
- [2] PEDRO, F. (2010): “Casa em Taipa, o regresso ecológico dos bons velhos tempos” – Revista. Arquitectura & Construção, Edição nº. 58 – Portugal (Cont.), Dezembro/Janeiro.
- [3] DECRETO-LEI 80/2006, (2006): “RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios”, 4 de Abril.
- [4] VERA SCHMIDBERGER, E. (2007): “A Responsabilidade do Sector da Construção Perante o Aquecimento Global” – 5º Seminário “Arquitectura de Terra em Portugal”, Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro, Portugal.
- [5] HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. (1994): “Earth Construction - A Comprehensive Guide”, ITDG Publishing, London, UK. Geohazards International.
- [6] MINKE, G. (2006): “Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture”. Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel-Berlin-Boston.
- [7] POLLOCK, S. (1999): “Ancient Mesopotamia”, Cambridge University Press.
- [8] HELFRITZ, H. (1937): “Land Without Shade.” Journal of the Royal Central Asian Society 24 (2): 20-16. http://en.Wikipedia.org/wiki/tower_block#Medieval_Yemen.
- [9] RIBEIRO, O. (1969): Geografia e civilização. Temas Portugueses, Colecção Espaço e Sociedade, Livros Horizonte, Lisboa, Portugal.
- [10] REEVES, G.M., SIMS, I.; CRIPPS, J.C., eds., (2006): “Clay materials used in construction: geological society Engineering Geology Special Publication No. 21. Bath, UK: Geological Society.

- [11] HERMANDEZ, R.S.; BARRIOS, M.S.; POZAS, J.M.M. (2000): "Characterization of ancient construction materials (mud walls and adobe) in the Churches of Cisneros", Villada and Boada de Campos (Palencia). *Materiales de Construcción* Vol. 50. n.º 257. pp. 33-45.
- [12] VEIGA OLIVEIRA, E.; GALHANO, F. (2002): "Arquitectura Tradicional Portuguesa." - Portugal de Perto Publicações D. Quixote. Portugal.
- [13] JORGE, F.; FERNANDES, M.; CORREIA, M. (2005): "Arquitectura de Terra em Portugal", 1ª ed. ,Lisboa, Argumentum, ISBN 972-8479-36-0.
- [14] INSTITUTO DE METEOROLOGIA, IP Portugal 2010. Disponível em:
<<http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html>>. Acesso em: Janeiro de 2010. ; <<http://www.meteo.pt/pt/oclima/acompanhamento/>>. Acesso em: Junho de 2010.
- [15] MENDONÇA, P. (2005): "Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados" - Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, Portugal.
- [16] DETHIER, J. (1983): "Down to Earth - Adobe architecture: an old idea, a new future". – New York: Facts on File Inc.
- [17] FERNANDES, M. (2005): "O adobe moldado". In Fernandes, M. & Correia, M. *Arquitectura de Terra em Portugal*. Lisboa: Argumentum. pp.45-49.
- [18] JALALI, S.; EIRES, R. (2008): "Inovações Científicas de Construção em Terra Crua" - Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, Portugal.
- [19] VARUM, H.; COSTA, A.; VELOSA, A.; MARTINS, T.; PEREIRA, H.; ALMEIDA, J. (2005): "Caracterização Mecânica e Patológica das Construções em Adobe no Distrito de Aveiro como Suporte em Intervenções de Reabilitação" Terra Brasil. Minas Gerais, Ouro Preto, 4 a 8 de Novembro de 2006. Education and Culture Program. Convento da Orada, Monsaraz, Portugal 23-25 de Novembro de 2005.
- [20] FARIA RODRIGUES, P. (2007): "Construções em terra crua. Tecnologias, potencialidades e patologias".Setúbal: Fórum Museológico do Distrito de Setúbal, 2007. Revista Musa,nº2 (Museu de arqueologia e Etnografia do distrito de Setúbal.

- [21] VARUM, H.; COSTA, A.; PEREIRA, H.; ALMEIDA, J.; RODRIGUES, H. (2006): "Avaliação Experimental do Comportamento Estrutural de Elementos Resistentes em Alvenaria de Adobe"- Universidade de Aveiro, Departamento de Eng. Civil, Aveiro, Portugal.
- [22] BUSON, M. (2009): "KRAFTTERRA: Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical.", Tese (Doutoramento) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasil.
- [23] RODRIGUES, P. (2005): "Construções em terra crua. Tecnologias, Patologias e Potencialidades", Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal.
- [24] SILVA, J.; VALE, C. (2010): "A utilização da Cortiça em Paredes de adobe, contexto Histórico e perspectivas futuras";FAUP – Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto. - 6ºSeminário Arquitectura em terra em Portugal. Lisboa Portugal: Argumentum.pp.184-187.
- [25] KHEDARI, J.; YAMTRAIPAT, N.; PRATINTONG, N.; HIRUNLABH, J. (2000): "Thailand ventilation comfort chart. Energy and Buildings 32: 245-249.
- [26] ROAF, S. (2004): "Sustainable products and materials". London: RIBA Enterprises
- [27] NICOL, F. (1993): "Thermal Comfort: a handbook for field studies toward and adaptive model." London: University of East London.
- [28] NICOL, J.F.; HUMPHREYS, M.A. (2002): "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings". Energy and Buildings 34: 563-572.)
- [29] HUMPHREYS, M.A.; NICOL, J.F. (2002): "The Validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments."- Energy and Buildings 34: 667-684.
- [30] RODRIGUES, A.; PIEDADE, A.; BRAGA, A., (2009): "Térmica dos edifícios", 1ª Edição, Edições Orion, Amadora, ISBN: 978-972-8620-13-4]
- [31] FOURIER, J. B.(1955): "The analytical theory of heat", Dover Publications, London.

- [32] SANTOS, C. A. PINA DOS; MATIAS, L., ITE 50, (2008): “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios”. Versão actualizada 2006, Lisboa.
- [33] VERA SCHMIDBERGER, E.; MOURÃO, J.; PEREIRA, M.; SOBRAL, M., (2005): “Projectar e construir com terra crua – algumas experiencias”. Terra em Seminário –IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 1ª ed. Lisboa. Argumentum , ISBN 972-8479-37-9.
- [34] NEVES, C., (2005): “O desempenho térmico da edificação em terra”. In M. Fernandes & M. Correia, eds. Arquitectura de terra em Portugal. Lisboa: Argumentum. pp.185-188.
- [35] FONTAINE, L, ANGER, R. (2009): “Bâtir en Terre. Du grain de sable à l'architecture”. Paris: Editions Belin/ Cité des Sciences et de l'industrie, pp153.
- [36] MORONY, J; WHITE, T. (2007): “Adobe Moisture Aborption and Temperature Control.”Proceedings; Fourth International Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest. Adobe USA 2007 May 18, 19, 20. Northern New Mexico Community College, El Rito, New Mexico.
- [37] KELLY, R. (1999): “Latent Heat Storage in Building Materials”, Building Services Engineering Diploma Dissertation, Dublin Institute of Tecnology, Bolton Street, Dublin, UK.
- [38] GONZÁLEZ, M.; NAVARRO, J. (2006): “Asssesment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Pratical case study of three houses of low environment impact.”.Building and Environment Vol. 41, pp.902-909.
- [39] MORTON, T.; STEVERSON, F.; TAYLOR, B.; SMITH, C. (2005): “Low Cost Earth Brick Construction: Monitoring and Evaluation”. Arc. Architects. ISBN 0-9550580-0-7.
- [40] SHUKLA, A.; TIWARI, G.; SODHA, M.S. (2008): “Embodied energy analysis of adobe house”. Renewable Energy 34, pp. 755-761.
- [41] FARIA, O. (2002): “Utilização de macrófitas aquáticas na produção de adobe”; um estudo de caso no reservatório de Salto Grande (America_SP). São Carlos; s.n., Dissertação.

- [42] CEPINHA, E.; FERRÃO, P.; SANTOS, S. (2007): "The Certification as an Enterprise Strategy of the Real Estate Sector: a National Scope Analysis". International Congress Sustainable Construction, Materials and Practices - Challenge of the Industry for the New Millennium: ISBN 978-1-58603-785-7, pp. 912-917, Portugal SB07, Lisboa.
- [43] MORTON, T. (2008): "Earth Masonry". Design and Construction Guidelines. ISBN 978-1-86081-978-0. HIS BRE Press.
- [44] HOWIESON, S. (2005): "Housing and Asthma". Spon Press, London ISBN 0-415-33646-5.
- [45] ARUNDEL, A.; STERLING, E.; BIGGIN, J.; STERLING, T. (1986): Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments. Environmental Health Perspectives, Vol. 65, pp.351-361.
- [46] CORTICEIRA AMORIM. Disponível em:
<http://www.corticeiraamorim.com/cor_sustentabilidade_relatorio.php> . Acesso em: Maio de 2010.
- [47] NORMA PORTUGUESA EN 933-1 (2000): "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados", Parte1: análise granulométrica, método de peneiração, Novembro.
- [48] FERNADES, M. (2006): "Conceitos e princípios fundamentais", Mecânica dos solos. Vol I, FEUP Edições, Porto.
- [49] ISO/TS 17892-1:2004 (E) (2004): "Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil". Part 1: Determination of water content, First edition, 15 de Outubro.
- [50] ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA PROTECÇÃO CIVIL DO MUNICÍPIO DE AVEIRO
- [51] ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO DEPARTAMENTO DE AMBIENTE UNIVERSIDADE DE AVEIRO
<http://climetua.fis.ua.pt/legacy/main/current_monitor/cesamet.htm>. Acesso em: Maio de 2010.
- [52] DIN EN ISO 6946:2008-04 (2008): "Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient". EEWärmeG: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich, 07 de Agosto.
- [53] DIN V 4108-4:2007-06 (2007): "Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden". Teil 4: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Berlin.

ANEXO A

RESTANTES DIAS DE REGISTO

Os restantes dias de registo por uma questão de agilidade de tratamento de resultados são aqui apresentados:

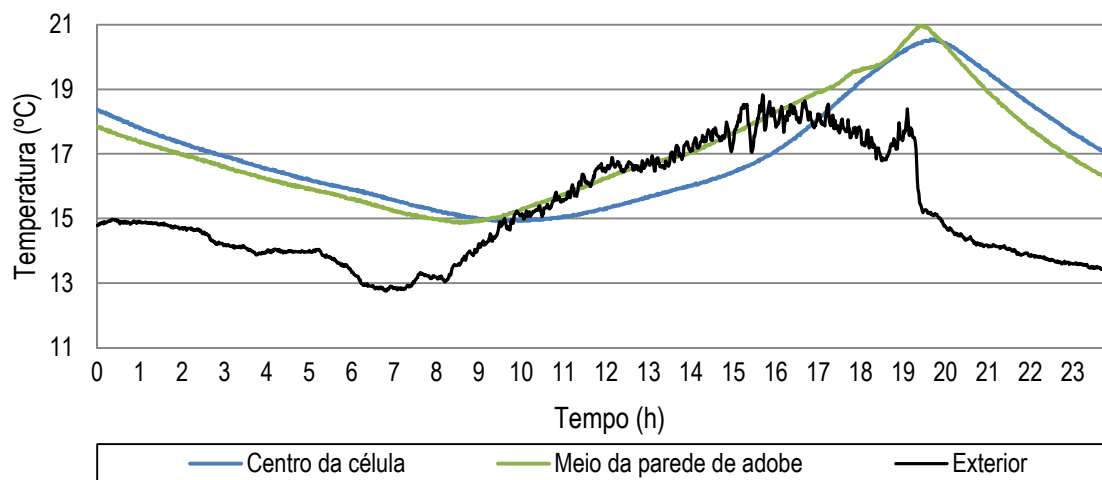


Figura A1: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 2 de Maio de 2010.

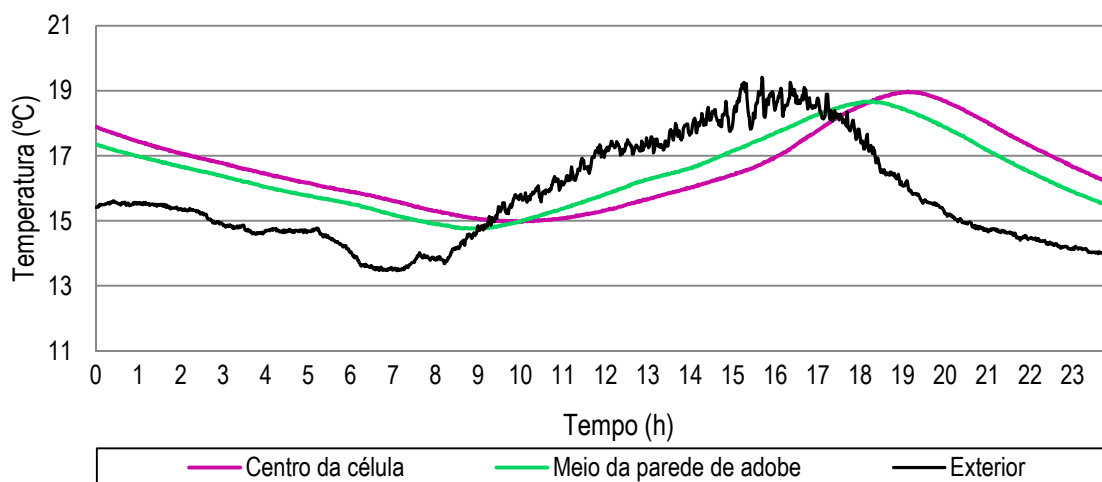


Figura A2: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 2 de Maio de 2010.

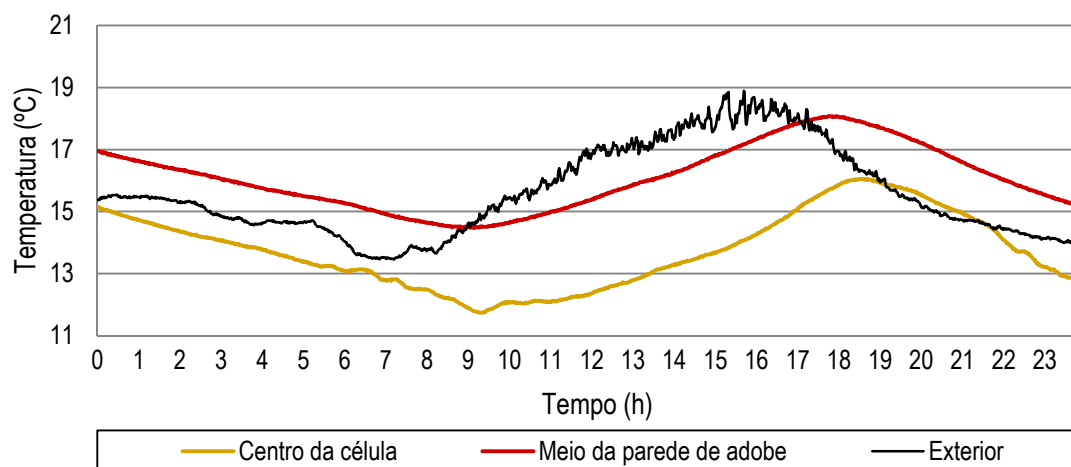


Figura A3: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 2 de Maio de 2010.

Tabela A1: Resultados do ensaio do dia 2 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	18,90	15h:41m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	20,55	19h:40m	-1,65	3h:59m
Centro da célula de teste nº 2	18,98	19h:08m	-0,08	3h:28m
Centro da célula de teste nº 3	16,06	18h:30m	2,84	2h:49m

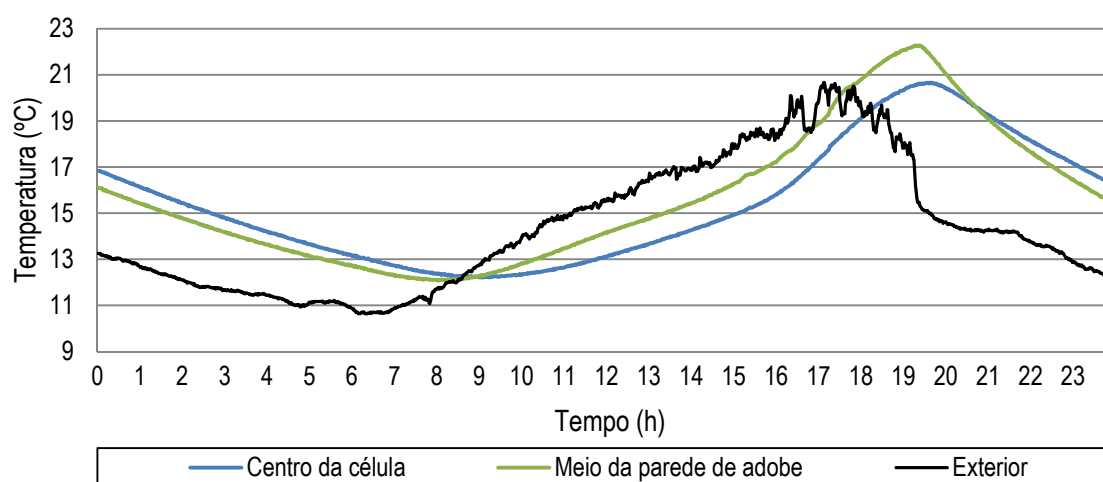


Figura A4: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 3 de Maio de 2010.

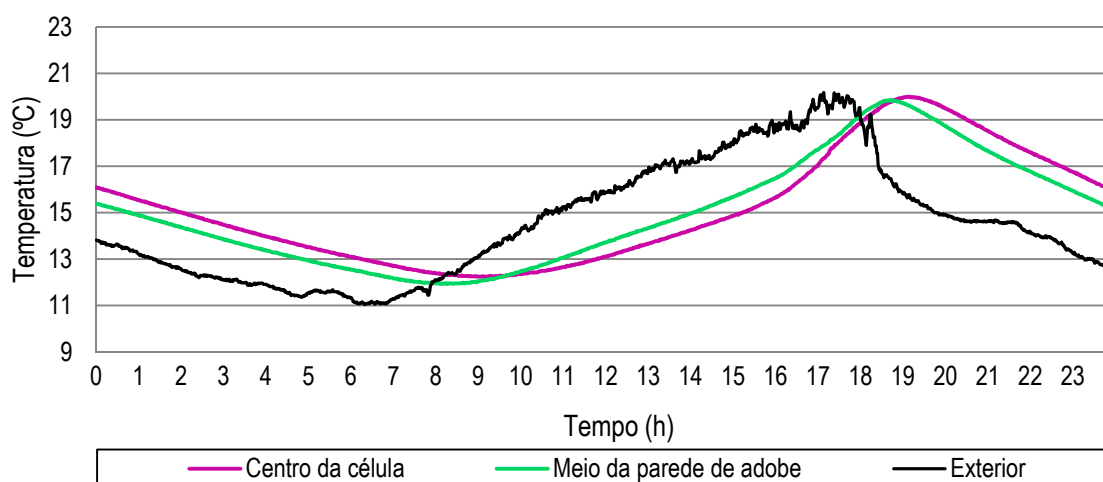


Figura A5: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 3 de Maio de 2010.

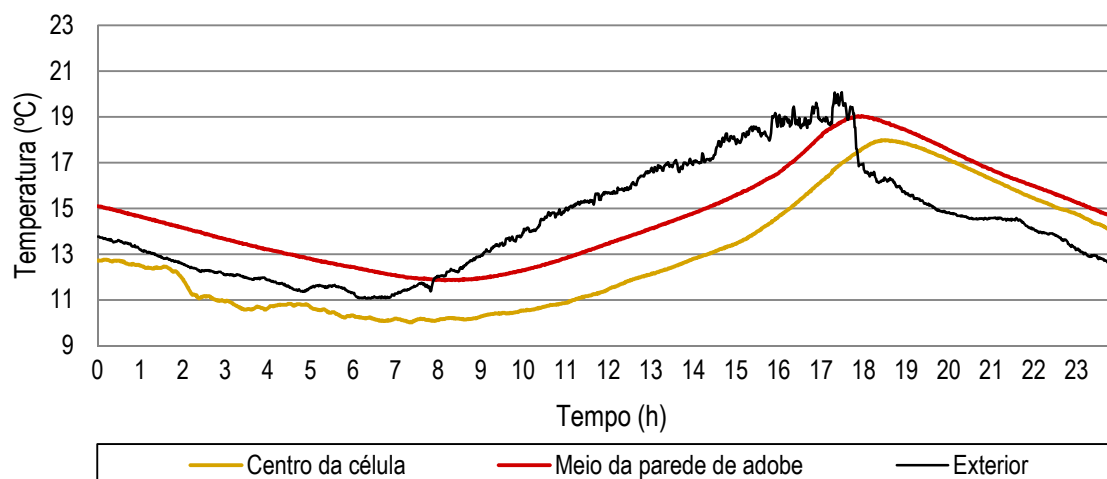


Figura A6: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 3 de Maio de 2010.

Tabela A2: Resultados do ensaio do dia 3 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	20,17	17h:08m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	20,66	19h:41m	-0,49	2h:33m
Centro da célula de teste nº 2	19,99	19h:10m	0,18	2h:02m
Centro da célula de teste nº 3	17,98	18h:34m	2,19	1h:26m

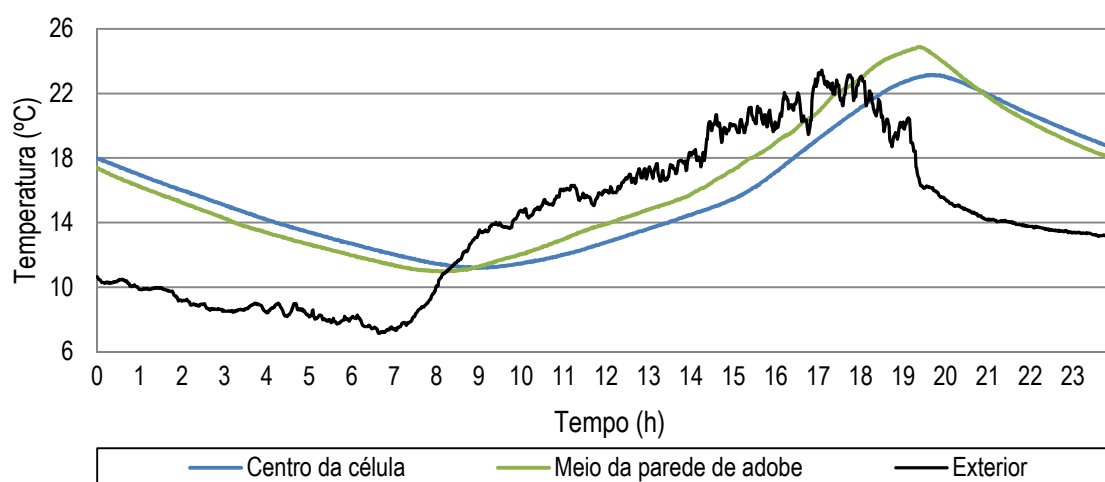


Figura A7: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 6 de Maio de 2010.

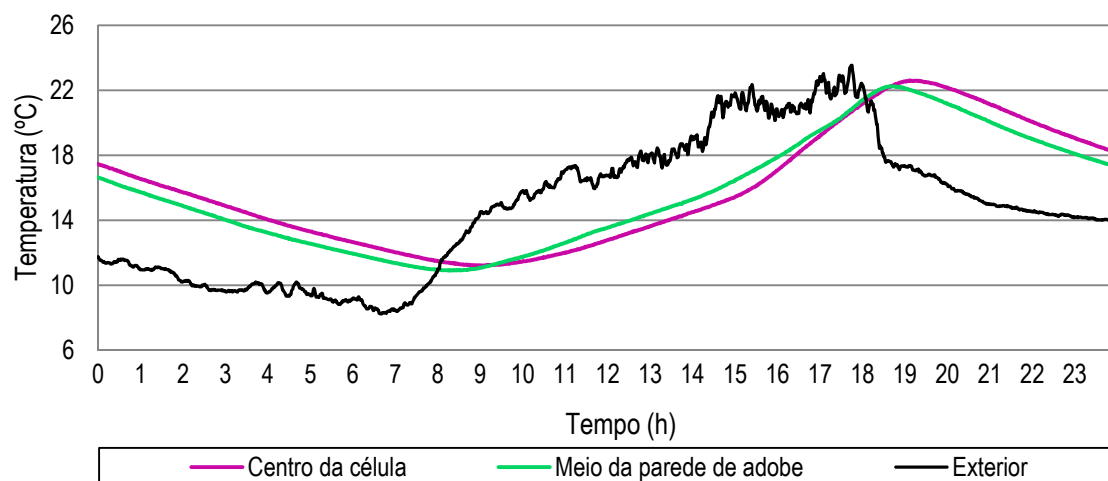


Figura A8: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 6 de Maio de 2010.

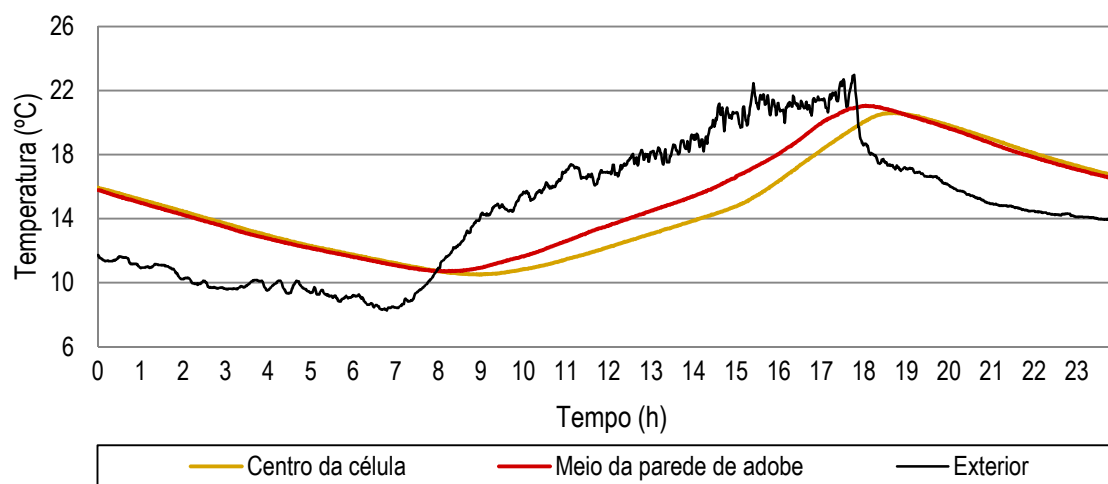


Figura A9: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 6 de Maio de 2010.

Tabela A3: Resultados do ensaio do dia 6 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	23,14	17h:45m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	23,16	19h:47m	-0,02	2h:03m
Centro da célula de teste nº 2	22,60	19h:07m	0,54	1h:22m
Centro da célula de teste nº 3	20,61	18h:39m	2,53	0h:54m

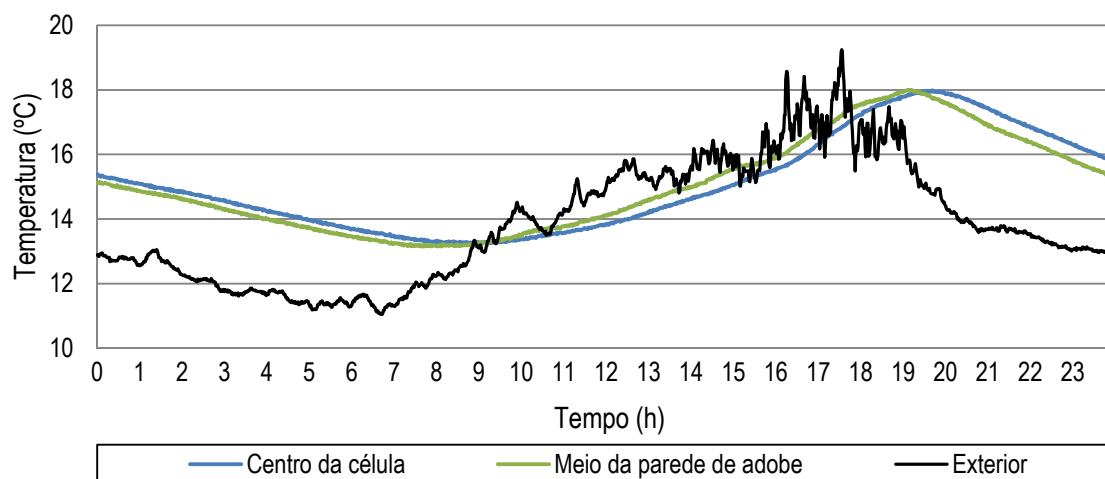


Figura A10: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 11 de Maio de 2010.

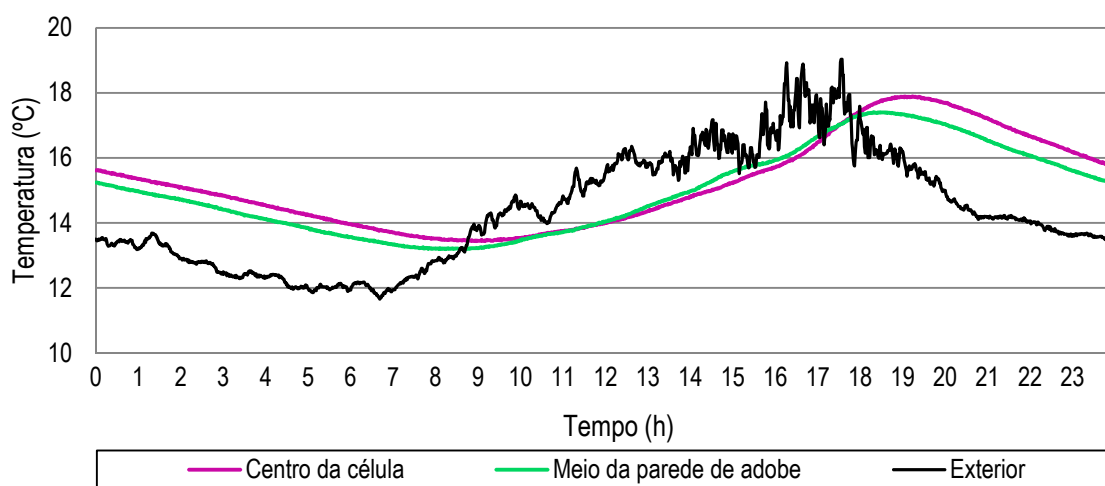


Figura A11: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 11 de Maio de 2010.

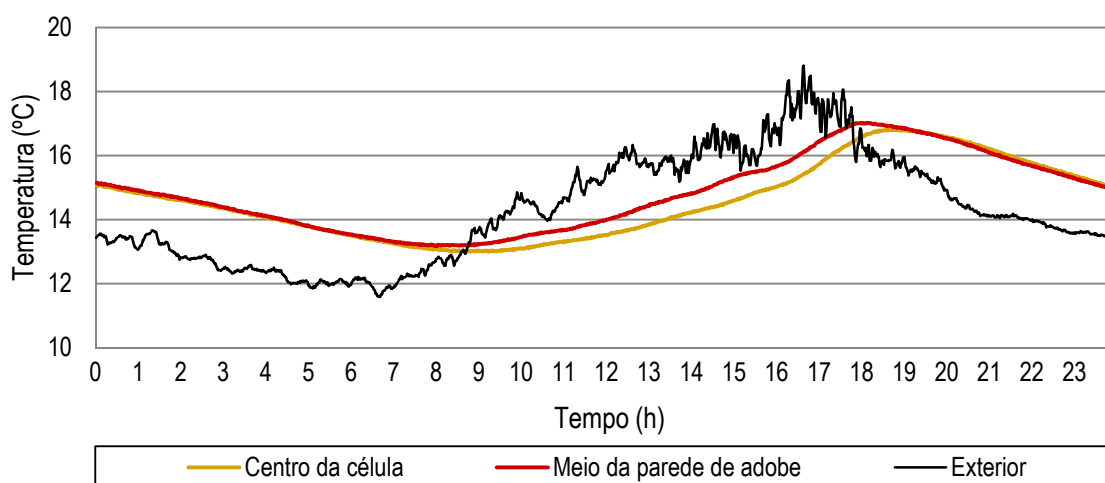


Figura A12: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 11 de Maio de 2010.

Tabela A4: Resultados do ensaio do dia 11 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	19,03	17h:35m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	17,99	19h:41m	1,04	2h:06m
Centro da célula de teste nº 2	17,89	19h:14m	1,14	1h:39m
Centro da célula de teste nº 3	16,82	18h:44m	2,21	1h:09m

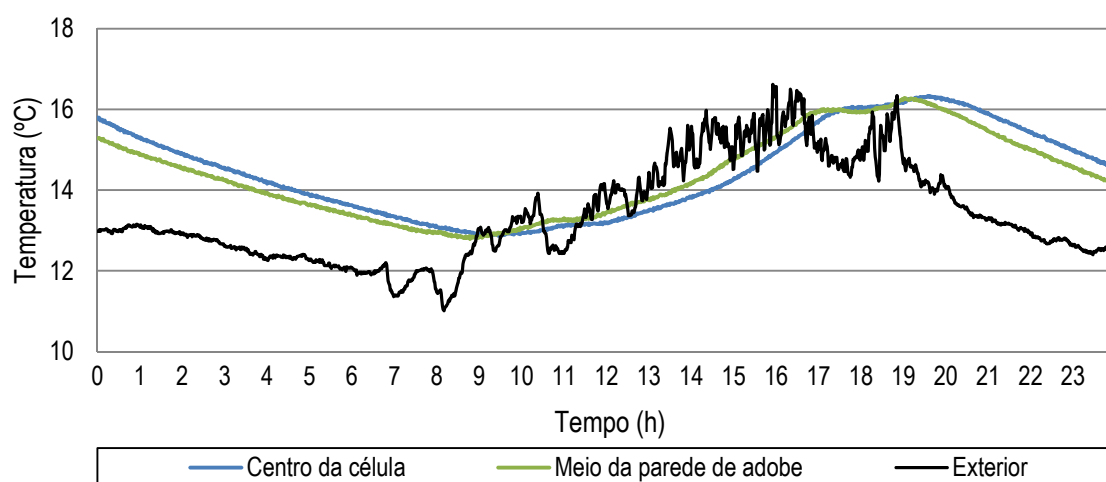


Figura A13: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 12 de Maio de 2010.

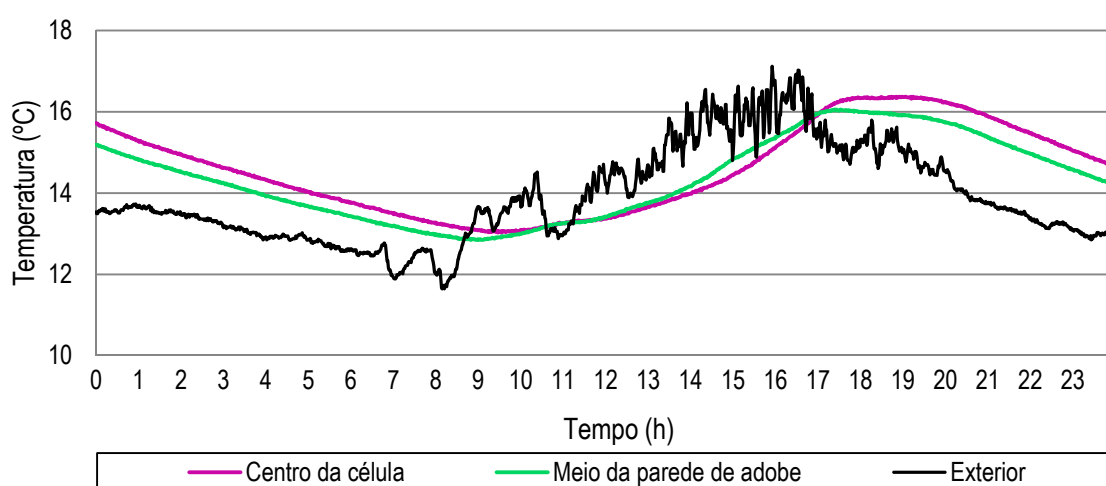


Figura A14: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 12 de Maio de 2010.

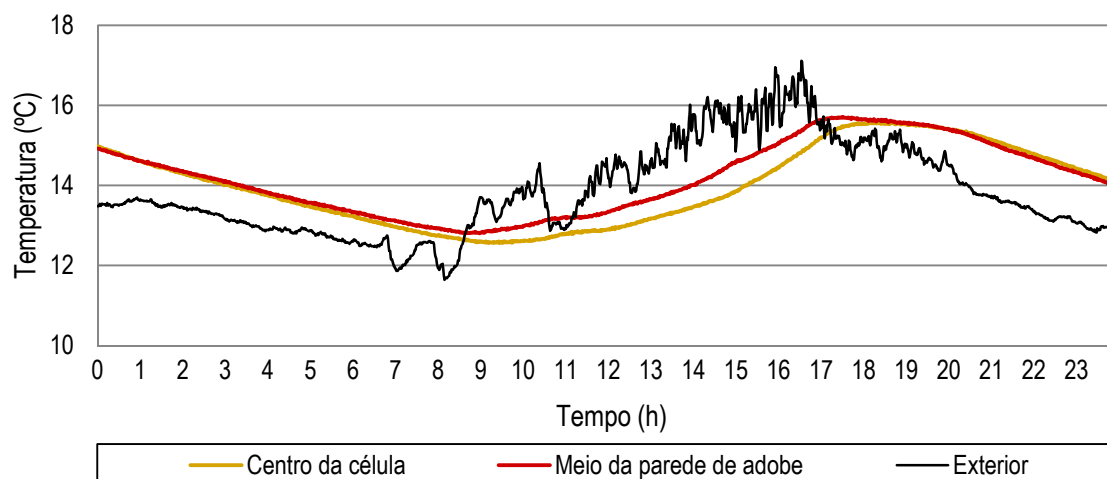


Figura A15: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 12 de Maio de 2010.

Tabela A5: Resultados do ensaio do dia 12 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	17,02	16h:33m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	16,33	19h:37m	0,69	3h:04m
Centro da célula de teste nº 2	16,37	18h:44m	0,65	2h:11m
Centro da célula de teste nº 3	15,57	18h:42m	1,45	2h:09m

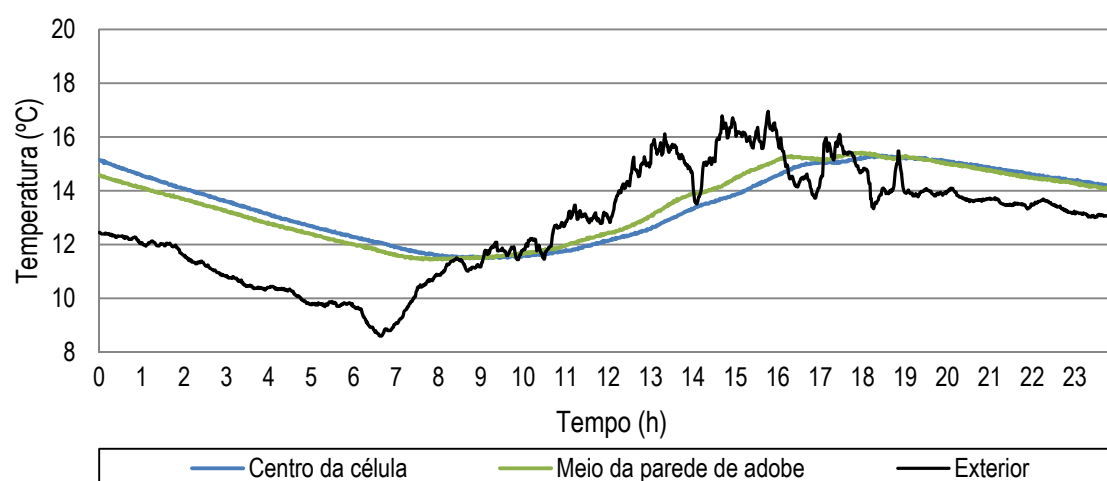


Figura A16: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 14 de Maio de 2010.

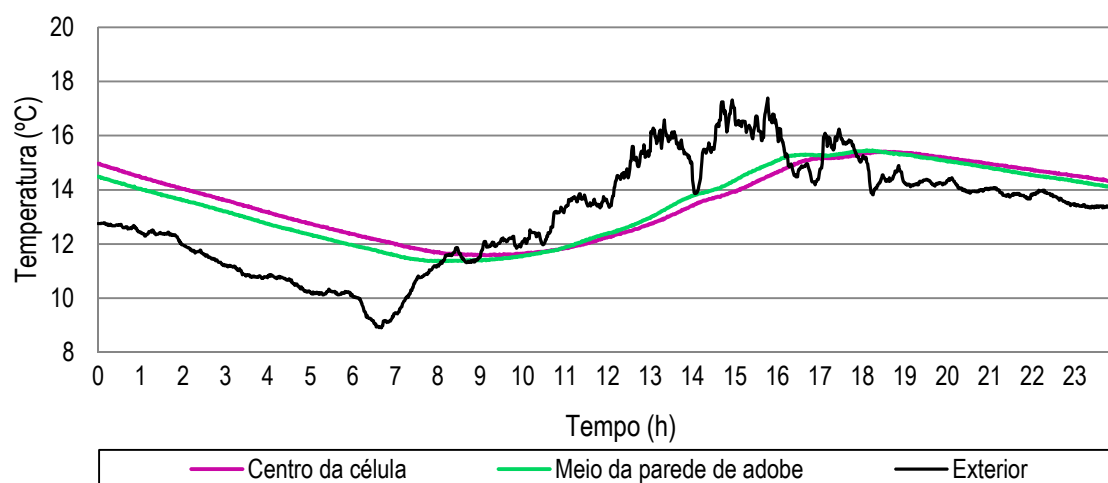


Figura A17: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 14 de Maio de 2010.



Figura A18: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 14 de Maio de 2010.

Tabela A6: Resultados do ensaio do dia 14 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	17,39	15h:46m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	15,31	18h:27m	2,08	2h:41m
Centro da célula de teste nº 2	15,41	18h:32m	1,98	2h:46m
Centro da célula de teste nº 3	15,07	18h:27m	2,32	2h:41m

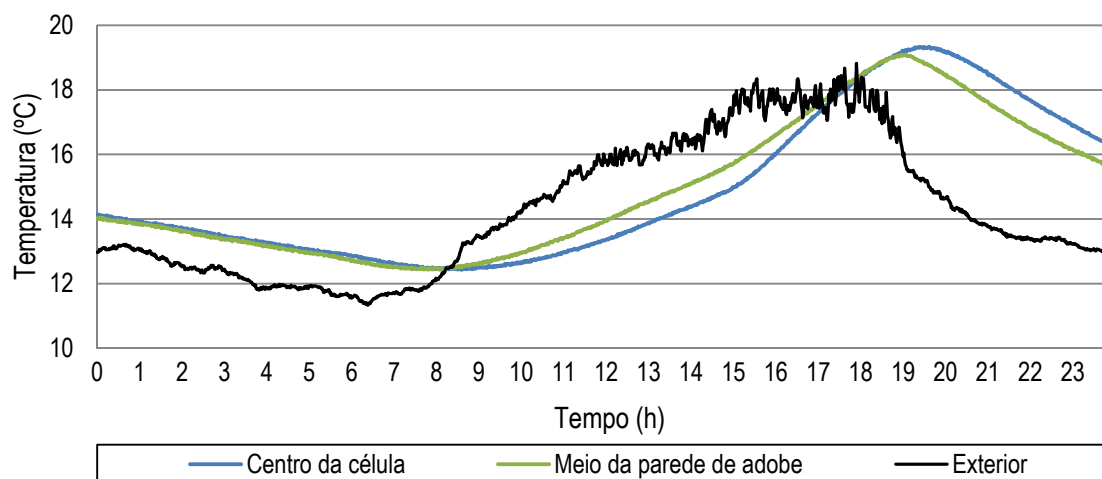


Figura A19: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 15 de Maio de 2010.

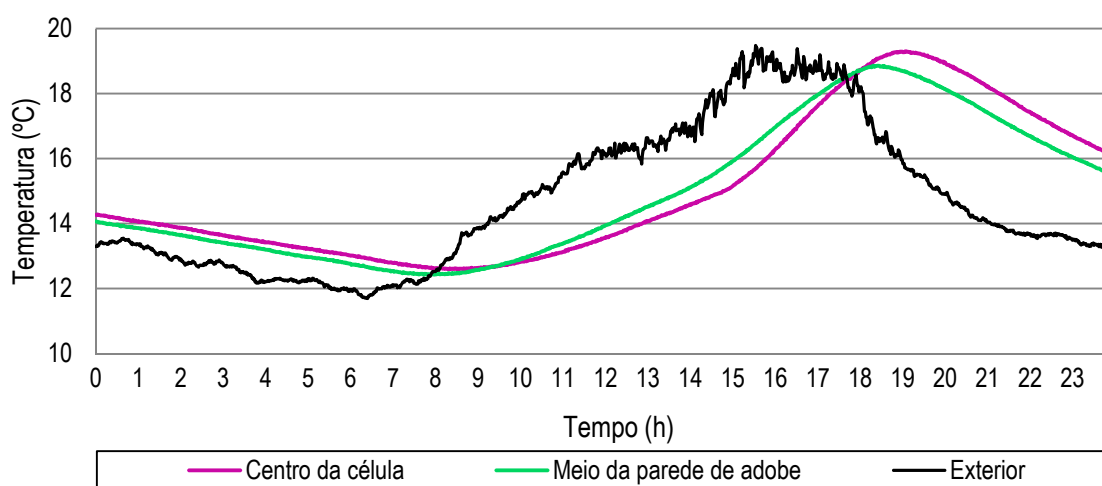


Figura A20: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 15 de Maio de 2010.

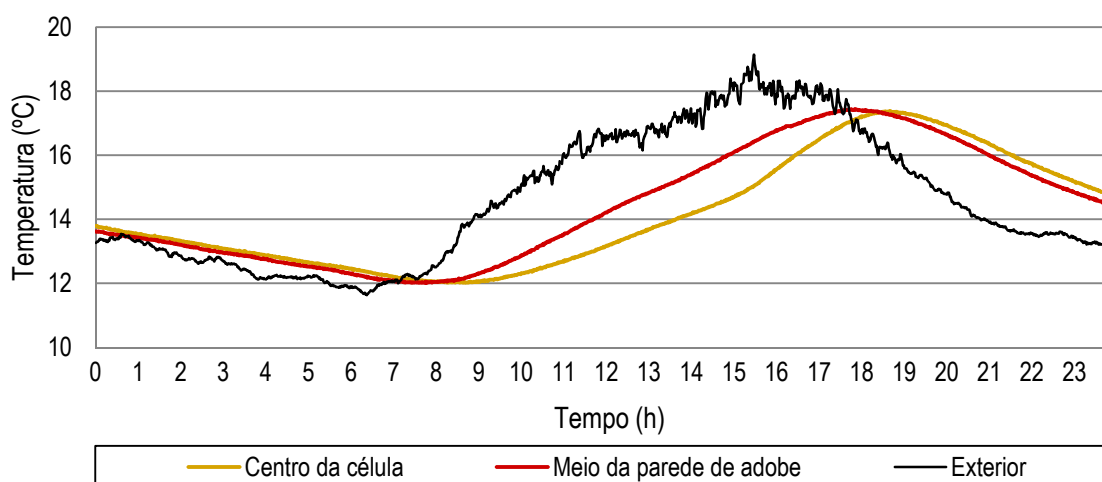
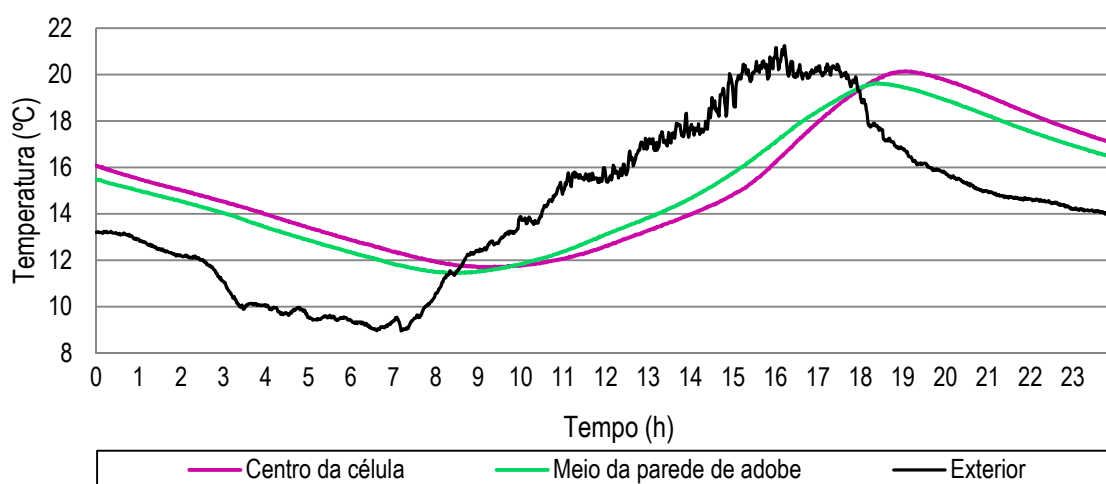
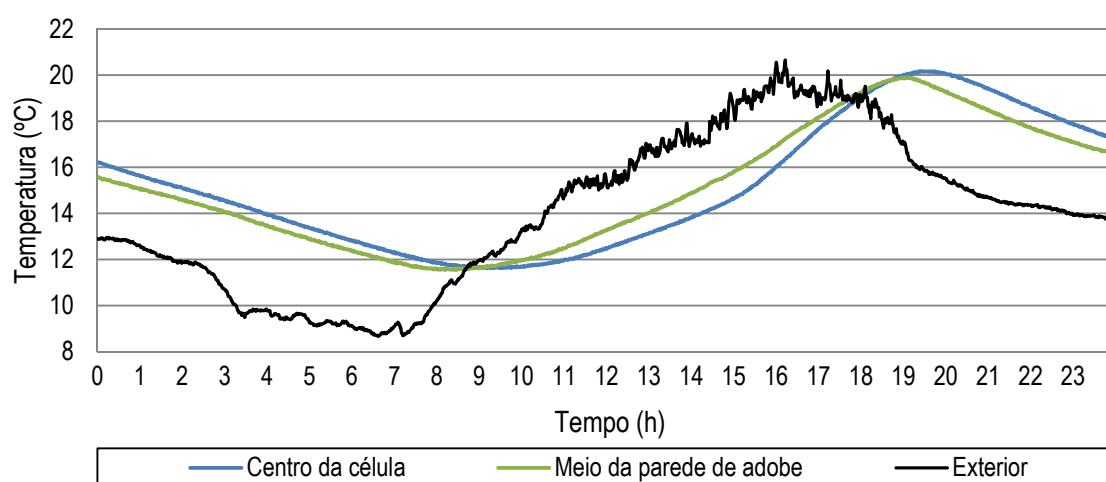


Figura A21: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 15 de Maio de 2010.

Tabela A7: Resultados do ensaio do dia 15 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	18,97	15h:29m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	19,33	19h:37m	-0,36	4h:08m
Centro da célula de teste nº 2	19,30	19h:05m	-0,33	3h:38m
Centro da célula de teste nº 3	17,38	18h:41m	1,59	3h:12m



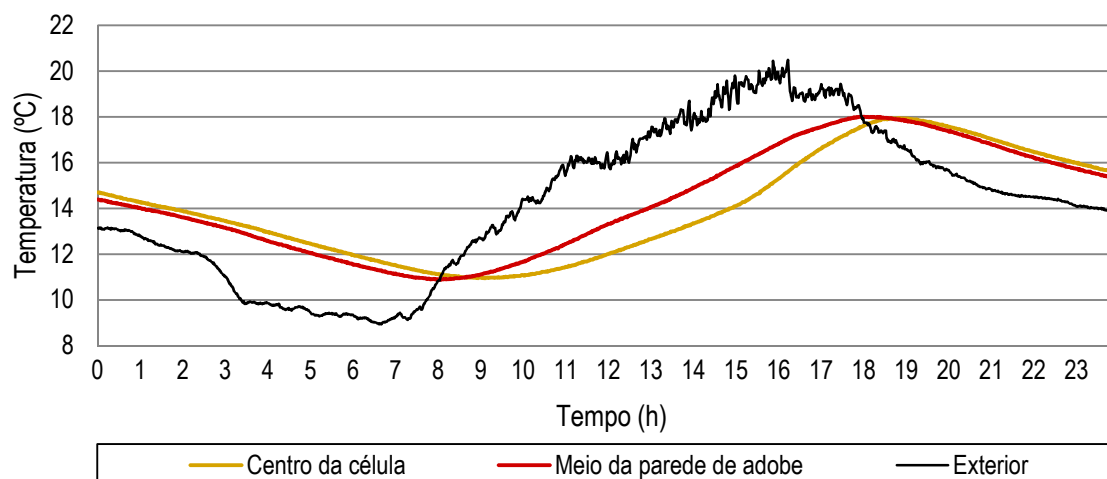


Figura A24: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 16 de Maio de 2010.

Tabela A8: Resultados do ensaio do dia 16 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	20,65	16h:13m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	20,17	19h:26m	0,48	3h:13m
Centro da célula de teste nº 2	20,14	19h:06m	0,51	2h:53m
Centro da célula de teste nº 3	17,94	18h:36m	2,71	2h:23m

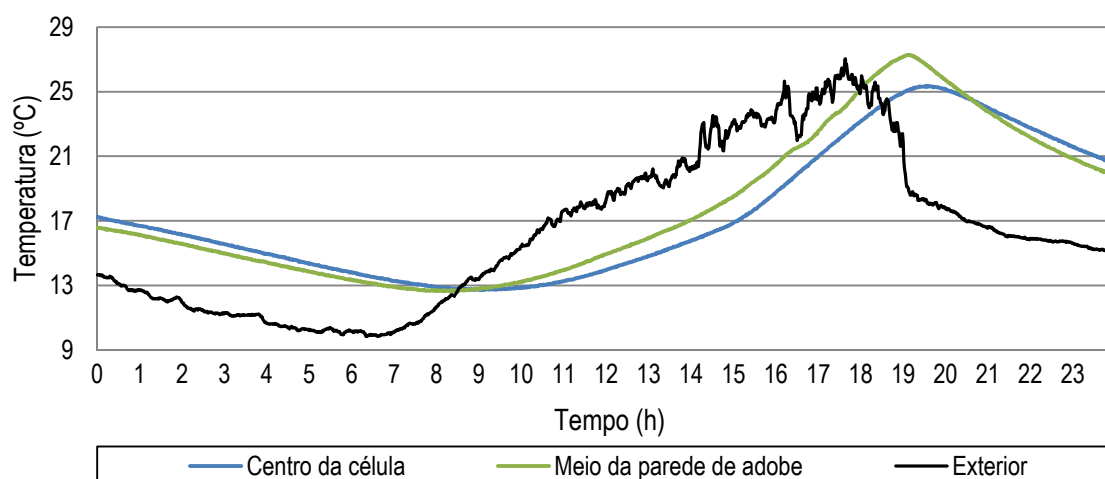


Figura A25: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 17 de Maio de 2010.

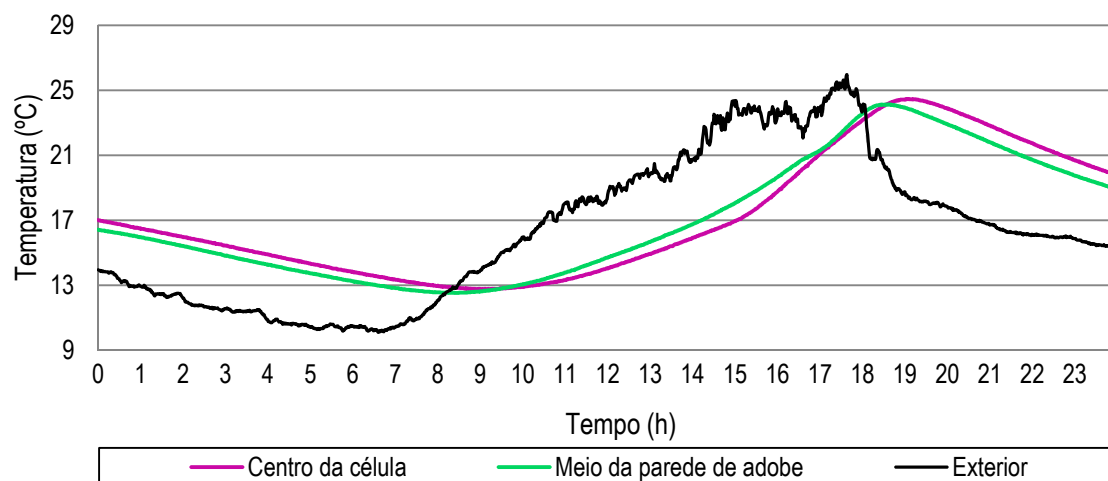


Figura A26: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 17 de Maio de 2010.

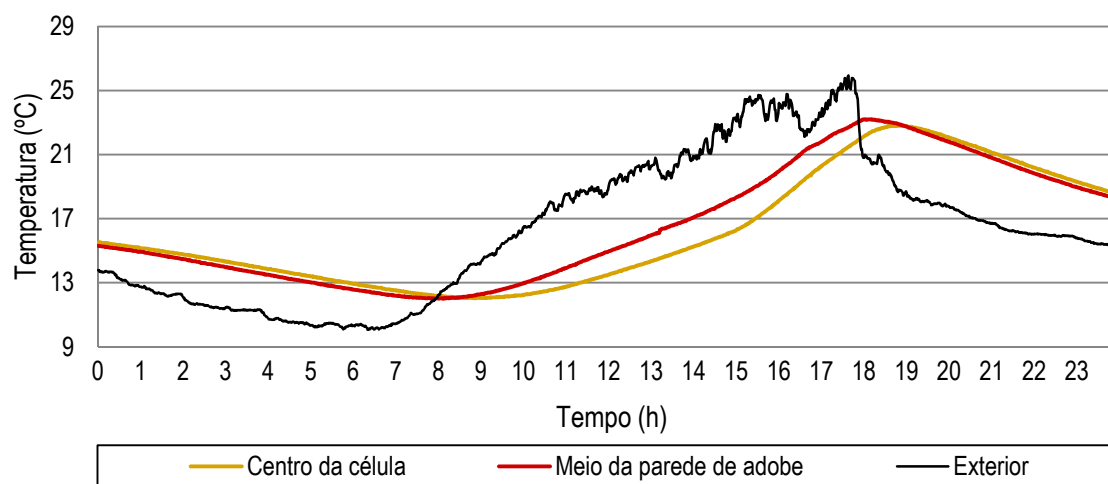


Figura A27: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 17 de Maio de 2010.

Tabela A9: Resultados do ensaio do dia 17 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	25,97	17h:38m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	25,34	19h:30m	0,63	1h:52m
Centro da célula de teste nº 2	24,46	19h:06m	1,51	1h:28m
Centro da célula de teste nº 3	22,82	18h:45m	3,15	1h:07m

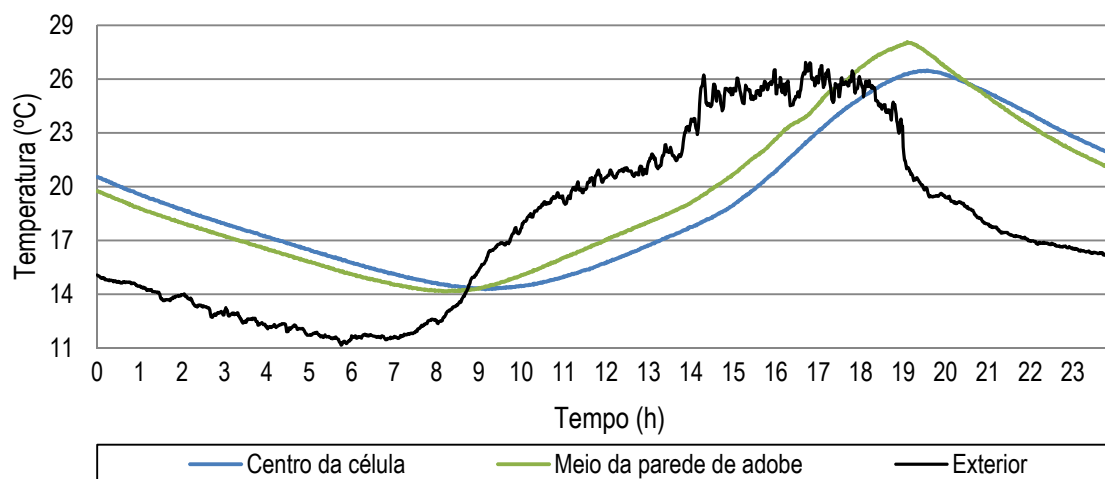


Figura A28: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 18 de Maio de 2010.

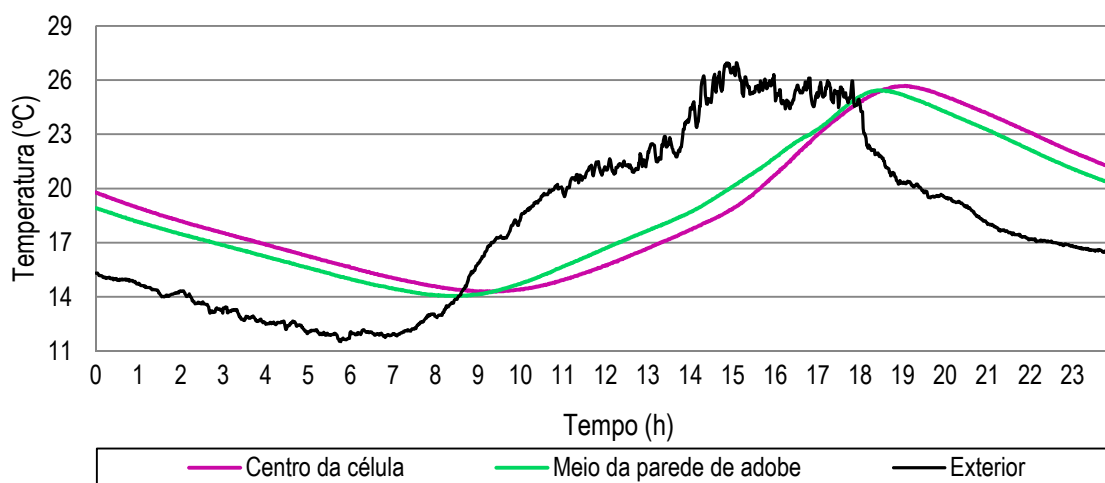


Figura A29: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 18 de Maio de 2010.

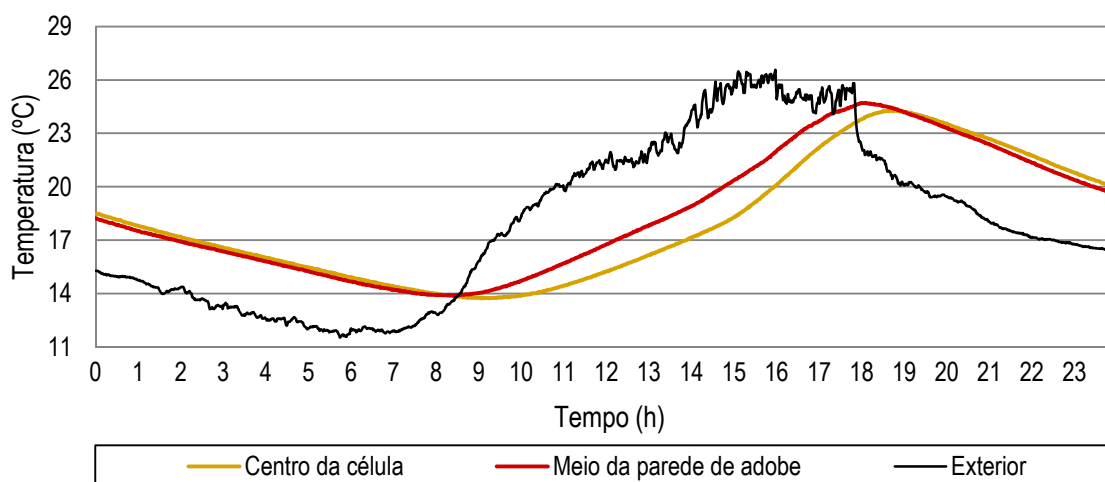


Figura A30: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 18 de Maio de 2010.

Tabela A10: Resultados do ensaio do dia 18 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	26,52	15h:58m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	26,48	19h:35m	0,04	3h:37m
Centro da célula de teste nº 2	25,68	19h:03m	0,84	3h:05m
Centro da célula de teste nº 3	24,27	18h:43m	2,25	2h:45m

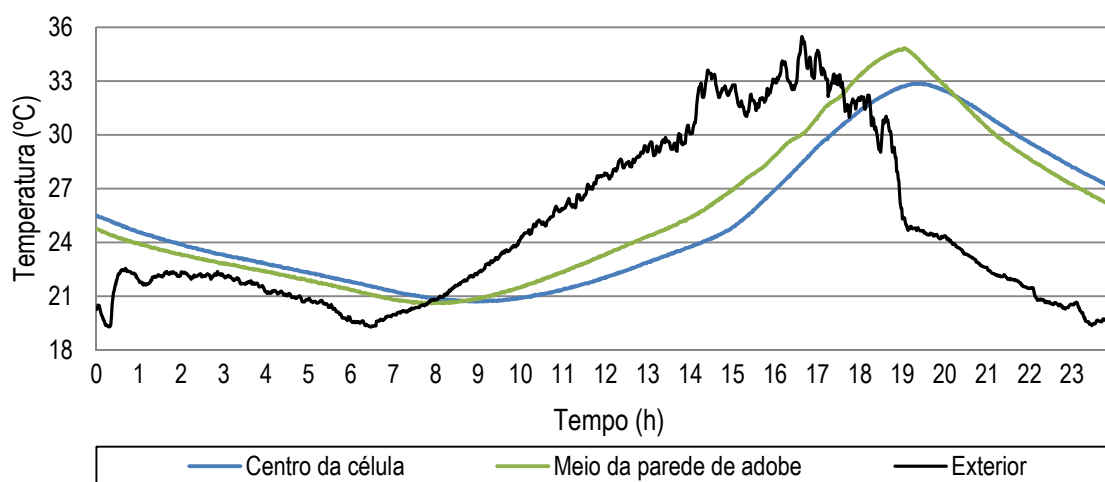


Figura A31: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 20 de Maio de 2010.

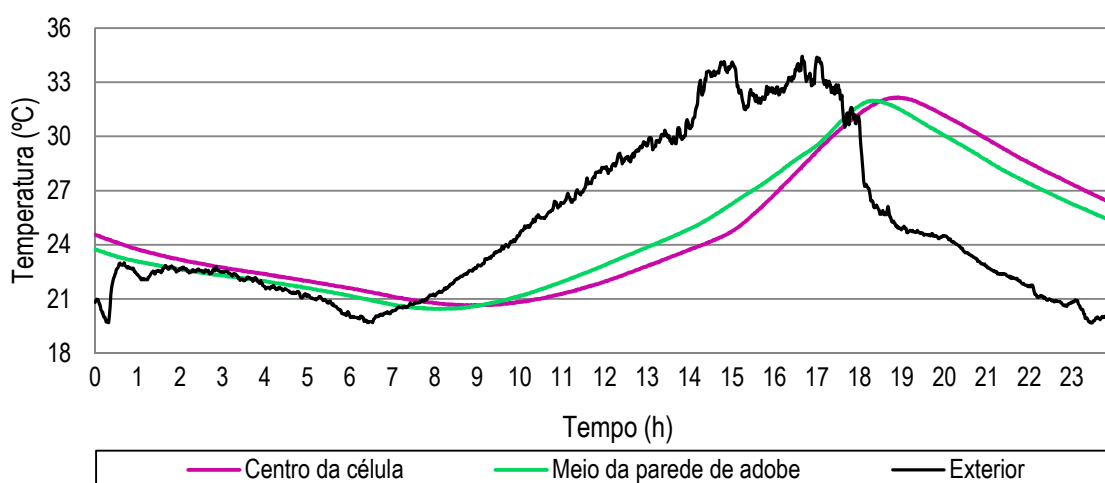


Figura A32: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 20 de Maio de 2010.

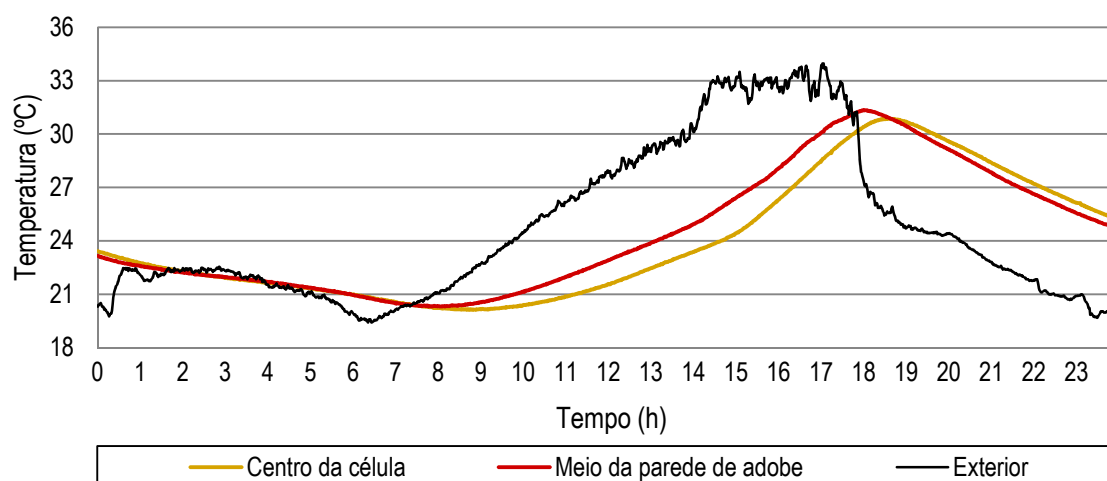


Figura A33: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 20 de Maio de 2010.

Tabela A11: Resultados do ensaio do dia 20 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	34,43	16h:39m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	32,87	19h:25m	1,56	2h:46m
Centro da célula de teste nº 2	32,16	18h:54m	2,27	2h:15m
Centro da célula de teste nº 3	30,87	18h:32m	3,56	1h:53m

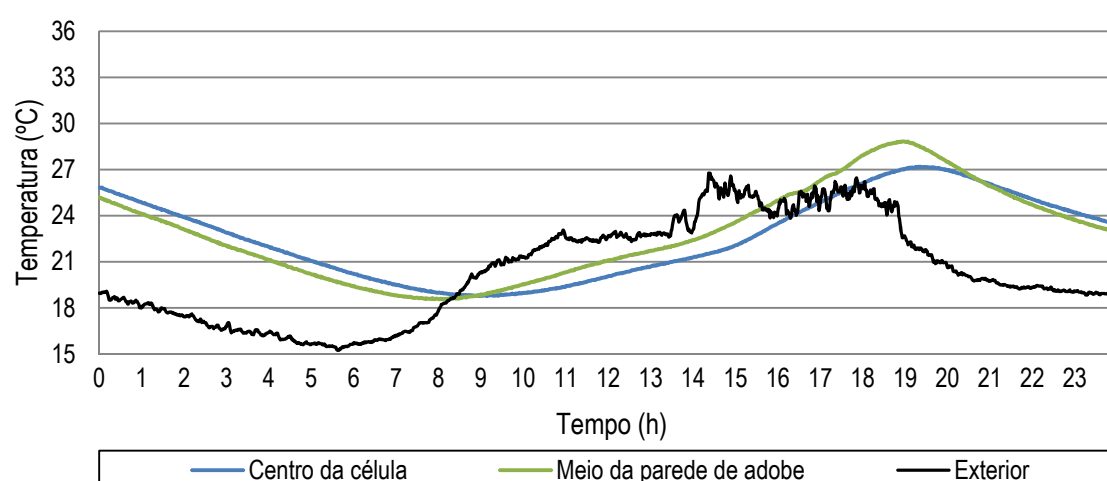


Figura A34: Temperaturas da célula de teste número 1 no dia 23 de Maio de 2010.

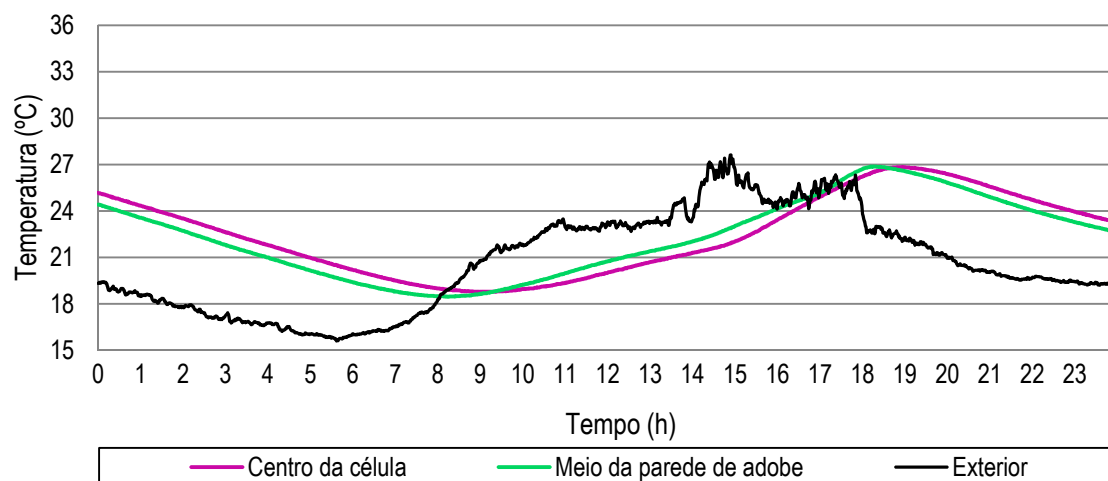


Figura A35: Temperaturas da célula de teste número 2 no dia 23 de Maio de 2010.

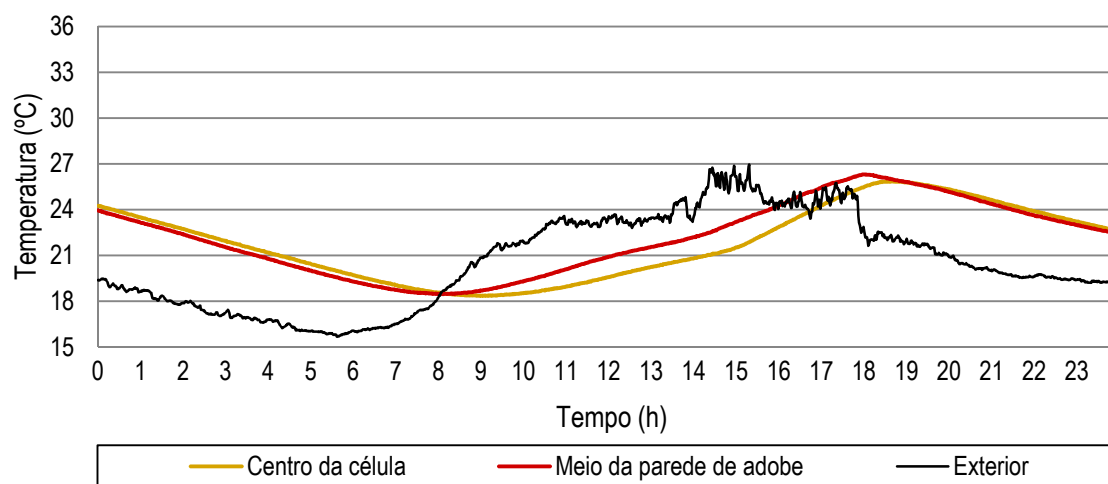


Figura A36: Temperaturas da célula de teste número 3 no dia 23 de Maio de 2010.

Tabela A12: Resultados do ensaio do dia 23 de Maio de 2010.

	Temperatura (°C)		Amortecimento (°C)	Atraso
	Valor máximo	Hora de registo		
Exterior media	26,86	14h:58m	-	-
Centro da célula de teste nº 1	27,19	19h:22m	-0,33	4h:24m
Centro da célula de teste nº 2	26,84	18h:51m	0,02	3h:53m
Centro da célula de teste nº 3	25,87	18h:36m	0,99	3h:38m